

ELEKTRIZITÄTSLEHRE

**Das Ringen mit dem sinnlich
Nicht - Wahrnehmbaren**

A. MACHOLD

**Pädagogische Hochschule Weingarten
2011**

MACHOLD, Adolf :
ELEKTRIZITÄTSLEHRE

**Das Ringen mit dem sinnlich
Nicht – Wahrnehmbaren**

Pädagogische Hochschule Weingarten
Kirchplatz 2
DE - 88250 Weingarten



Thermo-elektrisches Energie-Umwandlungs-Werk ("Kohlekraftwerk")
Altbach am Neckar

Inhalt

	Seite
Vorbemerkung	7
 I. Historischer Rückblick	 16
1. Vom geriebenen Bernstein zum Coulomb'schen Gesetz	17
2. Von der Stromkreiselektrik zur Vorstellung einer elektrischen Struktur der Materie	28
3. Anwendung naturwissenschaftlicher Ergebnisse	38
3.1 Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie	38
3.2 Übertragung von Nachrichten	42
 II. Grundlegende Phänomene und ihre begriffliche Erfassung	 47
1. Elektrizität – Ein faszinierendes Phänomen	53
1.1 Von der „Elektrizitätsmenge“ zur „elektrischen Ladung“	56
1.2 Die Messung der elektrischen Ladung	64
1.3 Eine weitere Möglichkeit zur Trennung elektrischer Ladungen – Die Influenz	78
2. Ruhende Ladungsträger - Zur Beschreibung der Phänomene ist eine weitere Größe erforderlich	 80
2.1 Das bestehende Problem	80
2.2 Eine experimentelle Erfahrung und ihre Folgerung - Der Weg zum Begriff der elektrischen Spannung	83
2.3 Die Messung der elektrischen Spannung	95

3. Strömende Ladungsträger - Von der Elektrostatik zur Stromkreiselektrik	101
3.1 Voltas Erfindung - Das Tor zur Stromkreiselektrik wird geöffnet	104
3.2 Der Weg zur Messung der strömenden Elektrizität - Die elektrische Stromstärke I	111
4. Die strömende Elektrizität wird behindert - Der Weg zum Begriff des elektrischen Widerstandes	121
4.1 Das Ohm'sche Gesetz (1826)	122
4.2 Der Begriff des elektrischen Widerstandes	126
5. Elektronenstrom und Energiestrom - Ungleiche Zwillinge	129

III. Weitere elektrische und magnetische Phänomene - Die Feldvorstellung	156
1. Das elektrische Feld - eine Folge ruhender Träger elektrischer Ladungen	159
1.1 Die elektrische Feldstärke - Eine Größe zur quantitativen Beschreibung des elektrischen Feldes	160
1.2 Eine weitere Größe zur Beschreibung des elektrischen Feldes - Die elektrische Verschiebungsdichte \vec{D}	165
2. Das Magnetfeld - eine Folge strömender Träger elektrischer Ladungen	172
2.1 Anmerkungen zur Magnetostatik	173
2.2 Der Grundversuch	175
2.3 Quantitative Erfassung des Magnetfeldes	179
2.4 Eine weitere Größe zur Beschreibung des Magnetfeldes - Die magnetische Feldstärke \vec{H}	182
2.5 Die Lorentz - Kraft	188

IV. Die elektromagnetische Induktion	192
1. Faradays große Entdeckung (1831)	192
2. Deutung der elektromagnetischen Induktion nach Maxwell (1862/1873)	196
3. Erweiterung des Induktionsgesetzes	201
4. Das Lenz'sche Gesetz (1834)	208
5. Ergänzung zum Vorzeichen der Induktionsspannung	211
6. Anwendung des Induktionsgesetzes	216
6.1 Der Wechselspannungsgenerator	216
6.2 Der Transformator	219
6.2.1 Der Transformator im Leerlauf	222
6.2.2 Der Transformator im Kurzschluss	227
 V. Elektrische und magnetische Felder sind Träger von Energie	235
1. Die Energie des elektrischen Feldes	236
2. Die Energie des Magnetfeldes	242
2.1 Die Eigeninduktivität einer Spule - eine Folge des Induktionsgesetzes	243
2.2 Herleitung einer Beziehung zur Beschreibung der Energie des Magnetfeldes	246
 VI. Die Abhängigkeit der Felddescription vom vom Bezugssystem	253
1. Die Abhängigkeit der Beschreibung des elektrischen Feldes vom Bezugssystem	254
2. Die Abhängigkeit der Beschreibung des magnetischen Feldes vom Bezugssystem	258
3. Ein Problem der Felddescription, der Lösungsvorschlag und seine Folgen	263

VII. Anhang: Ergänzungen	272
1. Gerät zur Messung der elektrischen Ladung	272
2. Quantitative Beschreibung der elektrischen Spannung	279
3. Der Gleichstrommotor	290
4. Abschirmung elektrischer und magnetischer Felder	302
4.1 Abschirmung elektrischer Felder	302
4.2 Abschirmung magnetischer Felder	305
5. Zur Erfassung des Begriffes der Feldstärke	308
5.1 Der Begriff der elektrischen Feldstärke und seine Verallgemeinerung	308
5.1.1 Einführung des Begriffes der elektrischen Feldstärke	308
5.1.2 Verallgemeinerung des Begriffes der Feldstärke	310
5.2 Der Begriff der Gravitationsfeldstärke	311
5.3 Der Begriff der magnetischen Feldstärke	314
5.4 Zusammenschau der verschiedenen Feldstärken	316
5.4.1 Das grundlegende Kraftgesetz	317
5.4.2 Die jeweiligen Feldstärken bei nahezu punktförmigen Kraftzentren	320
5.4.3 Betrachtung der Energiedichten der betreffenden Felder an der Erdoberfläche	322
VIII. Literatur	326
Bildnachweis	330

Vorbemerkung

Es ist ein Anliegen dieses Werkes Lehramtsstudenten beim Studium des Faches Physik eine Hilfe zu bieten. Der Blick ist dabei in besonderer Weise auf den Bereich der Sekundarstufe I gerichtet, die Sekundarstufe II bleibt ausgeklammert. Aus dieser Lage heraus ergeben sich unter anderem die nachfolgend genannten Aufgaben.

- Das Lehrangebot der Hochschule muss den künftigen Lehrern an der Sekundarstufe I ein fundiertes fachliches Wissen vermitteln. Die Lehrveranstaltungen sollten sich dabei nicht nur an aktuellen Bildungsplänen orientieren, sondern die Lehrinhalte sollten so gestaltet sein, dass der künftige Physiklehrer auch in neuen Situationen – beispielsweise bei veränderten Lehrplänen – sein Fach kompetent vertreten kann.
- Ein sehr wichtiger Punkt an der Hochschule betrifft die fachliche Orientierung der Lehrveranstaltungen; diese sollten nicht nur durch die besonderen Gegebenheiten der Fachsystematik geprägt sein, sondern es sollte in ausreichendem Maße die künftige berufliche Tätigkeit der Lehramtsstudenten in den Blick genommen werden. Dies bedeutet, dass an einer auf die Lehrerbildung ausgerichteten Hochschule das Fach Physik nicht in gleicher Weise gelehrt werden kann wie dies für spätere (Fach-) Physiker sinnvoll ist. An einer Pädagogischen Hochschule sollten daher auch in fachlich ausgerichteten Lehrveranstaltungen stets methodische und didaktische Überlegungen einfließen, die sich mit der Frage beschäftigen, wie diese Inhalte der Physik an Schüler der Sekundarstufe I vermittelt werden können.
- Für Lehramtsstudenten des Faches Physik ergibt sich aus dieser Situation ein Problem bezüglich der zu benützenden Literatur. Die Hochschullehrbücher für den späteren (Fach-) Physiker sind für den Lehramtsstudenten mit der Ausrichtung auf die Sekundarstufe I aus den dargelegten

Gründen zu umfangreich. Die fachdidaktische Literatur beschäftigt sich mit den Fragen der Unterrichtsgestaltung und dies ist eine Problematik, die in ihrer Vielschichtigkeit erst nach dem Erwerb eines fachlichen Grundwissens erkannt werden kann. Das vorliegende Werk möchte daher dazu beitragen, diese Lücke in der verfügbaren Literatur zu schließen mit dem Ziel, Lehramtsstudenten der angesprochenen Schulstufe einerseits das erforderliche fachliche Wissen zu vermitteln und andererseits bereits während des Studiums an die Praxis der späteren beruflichen Tätigkeit heranzuführen.

Die Bewältigung der hier genannten Aufgabe ist nicht leicht. Während beispielsweise ein Student des Faches Physik sich auf ein Fach konzentrieren kann, muss der Lehramtsstudent – je nach Prüfungsordnung – mehrere Unterrichtsfächer wählen. Hinzu kommen umfangreiche Pflichten im Bereich der Pädagogik und der ihr verwandten Disziplinen. Dies bedeutet, dass für Lehramtsstudenten eines Faches – hier des Faches Physik – nicht das gesamte Spektrum der Physik gelehrt werden kann, sondern dass eine Stoffauswahl getroffen werden muss. Die Beschränkung des Lehrstoffes an der Hochschule muss sich unter anderem auch daran orientieren, welche Anforderungen der Unterricht an den Physiklehrer der betreffenden Schulstufe stellt. Ferner sollten in den Lehrveranstaltungen der Hochschule nicht nur fachliche Inhalte gelehrt werden, sondern es sollten den künftigen Lehrern auch diejenigen Methoden vermittelt werden, mit deren Hilfe in den Naturwissenschaften Erkenntnisse gewonnen werden. Dies ist ein wichtiges Bildungsziel für Lehramtsstudenten und für Schüler. Es sollte angestrebt werden, auf diesem Wege den Menschen der heutigen Zeit die Einsicht zu vermitteln, dass das von den Naturwissenschaften entwickelte Weltbild sehr leistungsfähig ist, aber dennoch seine Grenzen hat. Nur wenn dies gelingt, kann in der Öffentlichkeit eine objektive Haltung gegenüber den Naturwissenschaften und der ihr verwandten Technik entstehen. Die Leistungen der naturwissenschaftlichen

Forschung und ihre Anwendung in der Technik, besonders auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre, begegnen dem heutigen Menschen auf Schritt und Tritt. Beispiele sind: Elektrogeräte in der Wohnung und im sonstigen täglichen Umfeld, die gewaltigen Anlagen zur Bereitstellung elektrischer Energie (z.B. Kohlekraftwerke, Talsperren, Kernreaktoren), die Geräte der gesamten Kommunikations- und Informationstechnik, Erdsatelliten und Weltraumsonden. Von vielen Menschen werden diese Leistungen wenig gewürdigt, sie werden vielfach als selbstverständlich angesehen, und anstatt all dies zu schätzen ärgert man sich nur, wenn einmal etwas nicht perfekt funktioniert. Es sollte daher ein Anliegen des Physikunterrichts sein, dazu beizutragen, dass die Ergebnisse naturwissenschaftlicher Forschung und ihrer Anwendung in der Technik als **Kulturleistung** der Menschheit erkannt und **anerkannt** werden. Dieser Wunsch sollte allerdings nicht den Blick darauf verstellen, dass der Mensch mit dem Erwerb dieses Wissens eine sehr große **Verantwortung** für sich und die gesamte ihn umgebende Natur übernommen hat und dass dieses Wissen die ernste Verpflichtung zum sorgfältigen und schonenden Umgang mit allen Gütern dieser Welt einschließt.

An dieser Stelle seien weiter einige Bemerkungen allgemeiner Art gestattet. Dem Physikunterricht stellen sich teilweise große Schwierigkeiten entgegen, einige davon werden nachfolgend genannt.

- Betrachtet man den heutigen Stand der Naturwissenschaften und der Technik, so kann man sicher sagen, dass diese Disziplinen große Fortschritte und außerordentliche Erfolge zu verzeichnen haben. Das Tätigkeitsfeld der Naturwissenschaften und der mit ihr verbundenen Technik ist die Arbeits- und Forschungswelt der Erwachsenen, und so ist es offenkundig, dass die Betrachtungsweisen, Modellvorstellungen und Theorien, die in der Physik erstellt wurden, Betrachtungsweisen von Erwachsenen für Erwachsene sind. Wenn man also die Welt der Physik

Schülern erschließen will, so hat man die fundamentale Aufgabe, diese Betrachtungsweise der Erwachsenen auf eine für Schüler geeignete Ebene zu transformieren. Dies ist eine sehr schwierige Aufgabe, denn einerseits sollen dabei die höchst komplexen Aussagen der Fachwissenschaft in ihrer Korrektheit erhalten bleiben, andererseits sollen diese Inhalte in eine für Schüler fassbare vereinfachte Form gebracht werden. Da die beteiligten kognitiven Prozesse bei Erwachsenen und Schülern nicht gleich sind, so ergibt sich daraus für den Unterricht eine höchst schwierige Aufgabe.

- Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Vorstellungswelt der Schüler. Lange bevor ein Schüler Physikunterricht erhält hat er durch den täglichen Umgang mit Geräten und Phänomenen viele „Alltagsvorstellungen“ entwickelt. Diese Alltagsvorstellungen werden ständig geprüft, sie verfestigen sich und sie werden von den jungen Menschen als zutreffend empfunden. Allerdings ist es so, dass sich einerseits diese Alltagsvorstellungen und andererseits die aus der Begriffsbildung der Physik resultierenden fachlichen Vorstellungen nicht immer decken, teilweise sind sie sogar konträr. Der Physikunterricht muss daher die Alltagsvorstellungen der Schüler in sein Konzept mit einbauen. Diese Aufgabe ist außerordentlich schwierig, denn aus der Sicht der Schüler haben sich ihre eigenen Vorstellungen jahrelang bewährt und sie tun es auch noch während der Zeit des Physikunterrichts. Diesen fest verankerten Vorstellungen setzt der Physikunterricht ein oder zweimal pro Woche in einer Unterrichtsstunde von weniger als sechzig Minuten Dauer die fachlich geprägten Vorstellungen entgegen. Es ist daher nicht verwunderlich, dass in dieser Auseinandersetzung zwischen Alltagsvorstellungen und fachlicher Betrachtungsweise die vom Physikunterricht betriebene Sichtweise einen sehr schweren Stand hat.
- Zu den genannten Problemen kommt eine weitere Schwierigkeit hinzu, nämlich die Sprache. Sie ist im

gesamten Unterricht ein sehr wichtiges – vielleicht sogar das wichtigste – Medium. Ein sorgfältiger Gebrauch der Sprache durch den Lehrenden kann den Schülern in vielen Situationen sehr helfen, eine unglücklich gewählte Formulierung kann aber auch viele Lernschwierigkeiten hervorrufen. Eine Ursache für solche Schwierigkeiten liegt darin, dass es Vokabeln gibt, die in der Alltagssprache (und den damit verbundenen Vorstellungen) und in der Fachsprache völlig unterschiedliche Bedeutungen besitzen. Bei Kenntnis dieser Probleme kann der Physiklehrer diese Dinge im Unterricht ansprechen und auf diese Weise die Schüler vor gedanklichen Irrwegen bewahren. Dies ist von großer Bedeutung, denn solche Missverständnisse können bei den Schülern das Verstehen des behandelten Stoffes vollständig blockieren und damit den gesamten Unterrichtserfolg gefährden.

- Das Bemühen der Physiker, die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeit in der Sprache der Mathematik zu formulieren, kann für Schüler mit den nötigen mathematischen Kenntnissen ebenfalls hilfreich sein. Für den Physikunterricht in der Sekundarstufe I ergibt sich daraus jedoch vielfach eine zusätzliche Schwierigkeit, denn es ist offenkundig, dass die Schüler dieser Schulstufe nur begrenzte Kenntnisse in Mathematik besitzen. Es ist daher eine vordringliche Aufgabe des Physikunterrichts in der S I Stufe, die Betrachtungen und Überlegungen zunächst auf qualitativer Stufe durchzuführen und die Ergebnisse entsprechend verbal zu formulieren. Nur wenn dies erfolgreich geschehen ist, kann sich danach – falls angebracht – eine quantitative Betrachtung anschließen. Man sollte sich aber stets vor Augen halten, dass für den fachlich versierten Physiker die Formulierung und Behandlung seiner Probleme in der Sprache der Mathematik eine Erleichterung darstellt (weil er diese Sprache beherrscht), dass aber für den Schüler der Gebrauch dieser „Sprache Mathematik“ vielfach eine zusätzliche Schwierigkeit bedeutet (weil er diese

Sprache nur bedingt versteht). Als Fazit kann man feststellen, dass im Physikunterricht der Sekundarstufe I ein zu früher Gebrauch der Mathematik das Verständnis der zu Grunde liegenden physikalischen Probleme eher behindert als fördert.

Nach den vorausgegangenen Betrachtungen stellt sich die Frage nach dem didaktischen Konzept zur Behandlung der Elektrizitätslehre im Unterricht der Sekundarstufe I. Nachfolgend werden zwei Positionen aufgezeigt.

Position 1

Ausgangspunkt der Überlegungen ist das im Physikunterricht vermittelbare Wissen und die Anwendung dieses Wissens in einer Vielzahl von Geräten und Messinstrumenten. Die Aufgabe des Physiklehrers besteht nun darin, dieses Wissen und diese Kenntnisse für die Schüler zugänglich zu machen. Ein bildhafter Vergleich kann dies beleuchten. Das von den Physikern errichtete Gedankengebäude der Physik kann mit einem riesigen, stark gegliederten Gebäudekomplex verglichen werden; in diesem befinden sich Geschäfte, Handwerks- und Industriebetriebe, Büros, Behörden und Wohnungen mit Treppenhäusern, Aufzügen, Fluchtwegen und Notausgängen. In diesem Gebäude braucht man Instruktoren, welche die in dem Komplex tätigen Menschen darüber informieren, wie sie sich in dem riesigen Areal zurechtfinden können. Die Aufgabe des Physiklehrers ist vergleichbar: Für seine Schüler muss er durch das hochdimensionale Gebäude der Elektrizitätslehre einen eindimensionalen Faden legen. Sein Ziel ist es, Verständnis für die verwendeten Begriffe, Zusammenhänge und Gesetze zu eröffnen und die Anwendung dieses Wissens in der Technik aufzuzeigen. Im Mittelpunkt der Betrachtungsweise stehen bei diesem Konzept das aktuell vorhandene Wissen und seine konkrete Anwendung. Dabei tritt die Frage, wie dieses Wissen im Laufe der Zeit erworben wurde, in den Hintergrund.

Position 2

Die hier aufgezeigte Position ist teilweise der erstgenannten ähnlich, teilweise unterscheidet sie sich auch deutlich. Gleich ist bei dieser Position hier der Wunsch, den Schülern den Weg zum Verstehen der Elektrizitätslehre und deren Anwendungen in der Technik zu öffnen. Darüber hinaus ist aber bei dieser Position noch die folgende Frage von zentraler Bedeutung:

„Wie sind die Menschen zu den heute vorliegenden Kenntnissen gelangt?“

Wird diese Frage gestellt, so muss man zwangsläufig den Blick richten auf die geschichtliche Entwicklung der Elektrizitätslehre. Für den Unterricht kann dies allerdings nicht bedeuten, dass man den historischen Weg sklavisch nachvollzieht. Vielmehr muss man den geschichtlichen Werdegang didaktisch aufarbeiten und daraus ein für die jeweilige Schulstufe geeignetes Konzept entwickeln. Eine Folgerung bezieht sich auf den Einstieg in die Elektrizitätslehre. Hier bietet sich eine (mindestens teilweise) Behandlung der Elektrostatik an und mit ihr die Einführung der elektrischen Ladung als Grundgröße der Elektrizitätslehre; dies gilt auch dann, wenn heute aus Gründen der messtechnischen Genauigkeit die elektrische Stromstärke als Grundgröße definiert ist. Die Position 2 stellt nicht das fertige Gedankengebäude der Physik an den Anfang, sondern es soll der Weg aufgezeigt werden, auf dem man zu diesem Ergebnis vordringen kann. Damit werden weitere grundlegende Ziele des Physikunterrichts angestrebt. Eines davon ist die Einsicht, dass es sehr schwer ist, in der Naturwissenschaft Erkenntnisse zu gewinnen – der Weg dorthin ist steinig, mühsam und nicht frei von Irrungen. Wer dies erkannt hat, wird die Leistungen der beteiligten Wissenschaften gebührend zu schätzen wissen. Weiter wird auf diesem Weg deutlich, dass die Gesetze der Physik immer nur unter ganz bestimmten Voraussetzungen gelten – sie besitzen also nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich. Will man Naturgesetze auf die Lösung eines konkreten Problems anwenden, so muss stets die Frage geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen diese

Gesetze formuliert wurden und ob im vorliegenden Fall diese Voraussetzungen erfüllt sind. Erst wenn dies eindeutig bejaht werden kann, darf man Naturgesetze anwenden.

Noch auf einen weiteren Punkt sei hingewiesen. Betrachtet man die Entwicklung der Physik so sieht man folgendes: Bei der Suche nach Begriffen und Gesetzen entwickeln die Naturwissenschaftler Vorstellungen der beobachteten Phänomene; diese Vorstellungen sind Bilder einer – wie auch immer gestalteten – Wirklichkeit, aber **nicht** diese Wirklichkeit selbst. Dies hat zur Folge, dass bei Auffindung neuer Kenntnisse diese Bilder unter Umständen korrigiert oder erweitert werden müssen. Grundsätzlich ist also eine naturwissenschaftliche Erkenntnis nie mit Sicherheit endgültig, sondern immer nur vorläufig. Außerdem wird auf diese Weise deutlich, dass die Vorstellungen, welche von den Physikern im Laufe der Zeit entwickelt wurden, nicht zwingend so entstanden sind, denn es hätte auch ein anderer Weg eingeschlagen werden können. Unsere Vorstellungen und Theorien von den Naturphänomenen sind also nur eine mögliche Sichtweise, aber nicht die einzige. Im Hinblick auf die Grundlagen naturwissenschaftlicher Erkenntnis ist dies von weitreichender Bedeutung.

Neben den hier angesprochenen Problemen allgemeiner Art gibt es bei der Einführung in die Elektrizitätslehre noch eine besondere Schwierigkeit; diese begründet sich darauf, dass der Mensch für elektrische und magnetische Erscheinungen kein Sinnesorgan besitzt. In den übrigen Teilgebieten der Physik ist dies anders. In der Mechanik haben wir es mit Körpern zu tun, die beispielsweise schwer oder leicht, fest oder flüssig sind, und diese Eigenschaften können wir mit unseren Händen im wahrsten Sinne des Wortes „begreifen“. Mit dem „Temperatursinn“ in unserer Haut besitzen wir ein Sinnesorgan, das einen möglichen Zugang zur Wärmelehre gestattet, und unsere Augen und unsere Ohren eröffnen einen Weg zu Optik und Akustik. Anders ist es dagegen in der Elektrizitätslehre. Da der Mensch auf direktem Wege elektrische Phänomene nicht wahrnehmen kann, so ist er darauf

angewiesen, dass diese Erscheinungen Sekundäreffekte hervorrufen, welche wir mit unseren Sinnesorganen registrieren können. Der Zugang zu dem Gebiet der Elektrizitätslehre ist also nur indirekt möglich, und dies ist ohne Zweifel eine große Erschwernis für das Verständnis. Auch wenn mit fortschreitender Erkenntnis auf diesem Gebiet im Laufe der Zeit Messinstrumente entwickelt wurden, die an die Stelle der uns Menschen fehlenden Sinnesorgane treten, so ersetzen diese nicht vollständig eine direkte eigene Erfahrung. Die Behandlung der Elektrizitätslehre ist daher nicht leicht, denn die Schüler können nur dann zu einem wirklichen Verständnis des zu behandelnden Stoffes vordringen, wenn – trotz vieler höchst eindrucksvoller Versuche – an vielen Stellen anspruchsvolle abstrakte Überlegungen durchgeführt und bewältigt werden.

Will man als Lehrer diese schwierige Aufgabe meistern, so muss man die den Lernprozess beim Schüler bestimmenden Faktoren in Betracht ziehen. Wie bereits erwähnt gehören dazu unter anderem die vorhandenen Alltagsvorstellungen, der Gebrauch und der Einfluss der Sprache sowie die Interessen der Schüler. Geht man von dieser Situation aus und richtet man den Blick auf den Erziehungs- und Bildungsauftrag der Schule so muss man nach einem gangbaren Weg Ausschau halten. Das vorliegende Werk möchte zur Bewältigung dieser Aufgabe im Sinne der eingangs erwähnten didaktischen Zielsetzung einen Beitrag leisten.

I. Historischer Rückblick

Die Elektrizitätslehre ist ein spannendes Teilgebiet der Physik, jedoch ist der Zugang zu dieser Thematik nicht ganz einfach, teilweise auch deshalb, weil der Mensch für elektrische und magnetische Vorgänge kein Sinnesorgan besitzt. Da eine auf den Unterricht in der Sekundarstufe I hin ausgerichtete Abhandlung in ganz besonderer Weise eine verständliche Darstellung des behandelten Stoffes anstrebt, so stellt sich hier die Frage, wie das Eindringen in komplizierte Sachverhalte erreicht werden kann. Ein Weg besteht darin, sich zu den Wurzeln des betrachteten Wissenschaftszweiges hinzuarbeiten. Ein Rückblick zu den Anfängen kann aber nicht nur darin bestehen besonders herausragende Ereignisse darzustellen, sondern es sollte vielmehr der Gang der Entwicklung beleuchtet werden.

Dieser Blick auf die Entstehungsgeschichte der Elektrizitätslehre soll zeigen wie und unter welchen Bedingungen das heutige Gedankengebäude dieses Teilgebietes der Physik entstanden ist. Beispielsweise führte die historische Entwicklung zuerst zum Begriff der elektrischen Ladung; dies kann ein Hinweis darauf sein, die unterrichtliche Behandlung der Elektrizitätslehre mit der Elektrostatik zu beginnen – nicht um die chronologische Abfolge nachzuvollziehen, sondern weil dieser Zugang von elementaren Erfahrungen ausgeht und (trotz aller grundlegenden Schwierigkeiten) relativ gut verständlich ist. Durch diese Vorgehensweise soll der Weg geebnet werden für die Erkenntnis, dass die von Wissenschaftlern im Laufe der historischen Entwicklung gewählte Beschreibung der Natur ein bewundernswertes Werk des menschlichen Geistes darstellt, dass der eingeschlagene Weg aber nur eine von vielen Möglichkeiten ist. Die nachfolgenden Ausführungen möchten dazu einen Beitrag leisten.

1. Vom geriebenen Bernstein zum Coulomb'schen Gesetz

Sucht man nach den Anfängen der Elektrizitätslehre, so kann man diesen wohl in der griechischen Antike vermuten. Das „Experimentiermaterial“, mit welchem die ersten Versuche gemacht wurden, die in Richtung derjenigen Disziplin weisen, die wir heute „Elektrizitätslehre“ nennen, war ein Stoff, der an der Küste der Ostsee gefunden wurde und auf Handelswegen in den Mittelmeerraum gelangte, nämlich der Bernstein. Der griechische Name dieses Stoffes ist Elektron, und daraus leitet sich unser Wort „Elektrizitätslehre“ ab. In der Antike war bekannt, dass geriebener Bernstein andere leichte Körper, beispielsweise Samen von Pflanzen, anzieht. Über weitere Nachforschungen nach den Ursachen dieser Anziehungskräfte ist nichts bekannt, und auch in späterer Zeit wurde dieses Problem offenbar nicht aufgegriffen. Nähere Untersuchungen über magnetische und elektrische Kräfte wurden erst von dem englischen Arzt William GILBERT (1544 – 1603) in seinem Buch „De Magnete“ (1600) geschildert. Gilbert führte umfangreiche Untersuchungen durch und stellte fest, dass die bei geriebenem Bernstein zu beobachtenden Kräfte auch bei Körpern aus anderen Materialien auftreten, so bei Diamant, Saphir, Amethyst, Bergkristall, Schwefel und Harz. Auf Grund seiner Versuchsergebnisse teilte Gilbert die untersuchten Stoffe in zwei Gruppen ein, nämlich in solche, die nach dem Reiben andere Stoffe anzogen und in solche, die dies nicht taten. Die erste Gruppe nannte er „elektrische“ Körper, die zweite Gruppe „unelektrische“ Körper. Ferner stellte er fest, dass durch Reiben „elektrisch“ gemachte Körper sowohl „elektrische“ als „unelektrische“ Körper anziehen. Zur Vermeidung von Missverständnissen auf Grund der Ausdrucksweise sei hier angefügt, dass die von Gilbert als „elektrisch“ bezeichneten Körper von uns heute als „Isolator“ bezeichnet werden, wohingegen diejenigen Stoffe, die Gilbert „unelektrisch“ nannte, heute von uns als „elektrische Leiter“ bezeichnet werden. Der

Hintergrund dieser Bezeichnungsweise ist leicht einzusehen: Ein Glasstab (also in unserer heutigen Ausdrucksweise ein „Isolator“) ist nach dem Reiben „elektrisch geladen“, ein Metallstab (also ein guter „elektrischer Leiter“) nach dem Reiben dagegen nicht.

Gilbert unterschied auch zwischen elektrischen und magnetischen Kräften. Er beobachtete, dass in feuchter Luft die elektrischen Kräfte deutlich kleiner sind als bei gleicher Versuchsdurchführung in trockener Luft, wohingegen die von Magneten ausgehenden Kräfte von solchen äußeren Einflüssen unabhängig sind.

Die Untersuchungen von Gilbert wurden einige Jahrzehnte später (um 1650) durch Otto von GUERICKE (1602 – 1686) fortgeführt. Guericke wurde besonders berühmt durch seine Forschungsarbeiten zur Frage nach der Existenz eines Vakuums. Er entwickelte eine funktionsfähige Luftpumpe und konnte durch höchst eindrucksvolle Versuche (sehr großes Aufsehen erregte 1650 der Versuch mit den „Magdeburger Halbkugeln“) seine wissenschaftliche Auffassung überzeugend begründen. Auch auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre war Guericke höchst kreativ. Er konstruierte eine „Elektrisiermaschine“, mit welcher er erstaunliche Experimente durchführte. Die Maschine bestand aus einer großen Schwefelkugel, die um eine waagrechte Achse gedreht werden konnte. Der leitend mit dem Erdboden verbundene Experimentator drückte beide Hände fest an die Schwefelkugel, die Kugel wurde anschließend um die Achse gedreht und war dann viel stärker „elektrisch geladen“ als geriebener Bernstein. Guericke beobachtete, dass die Kugel nach dem Reiben Flaumfedern anzog, dass sich die Federn auf die Kugel zu bewegten, sie berührten und anschließend von der Schwefelkugel abgestoßen wurden. Nahm man jetzt die Kugel aus ihrer hölzernen Halterung heraus so konnte man die Federn in der Luft schweben lassen. Es lag also die wichtige neue Erkenntnis vor, dass es nicht nur anziehende, sondern auch abstoßende elektrische Kräfte gibt. Guericke beobachtete ferner, dass die „Elektrizität“ der Kugel mit Hilfe einer Schnur aus Leinen weiter geleitet werden konnte. In unserer heutigen Ausdrucksweise

bedeutet dies: Guericke stellte fest, dass es elektrisch leitende Materialien gibt.

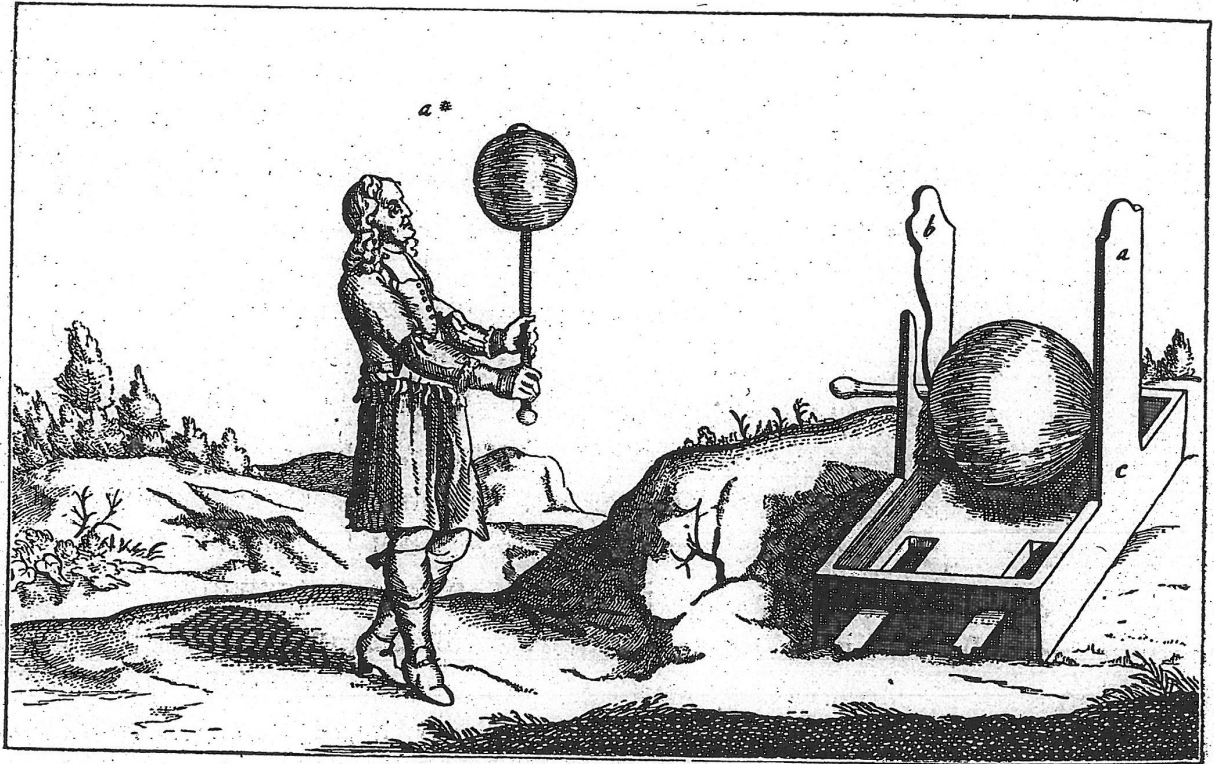


Abb. 1.1.1: „Elektrisiermaschine“ nach Otto von Guericke (um 1650). Durch Reiben der Hände des Experimentators an der rotierenden Schwefelkugel wird diese „elektrisch“ und übt dann auf in der Luft befindliche Flaumfedern anziehende und nach deren Berührung abstoßende Kräfte aus.

Ein grundlegendes Problem der damaligen Zeit war es, „Elektrizität“ herzustellen. In unserer heutigen Ausdrucksweise lautet dieses Problem: Wie kann man experimentell erreichen, dass ein Körper „elektrisch geladen“ wird? Eine grundsätzliche Antwort auf diese Frage lieferte Guericke mit seiner hier beschriebenen „Elektrisiermaschine“.

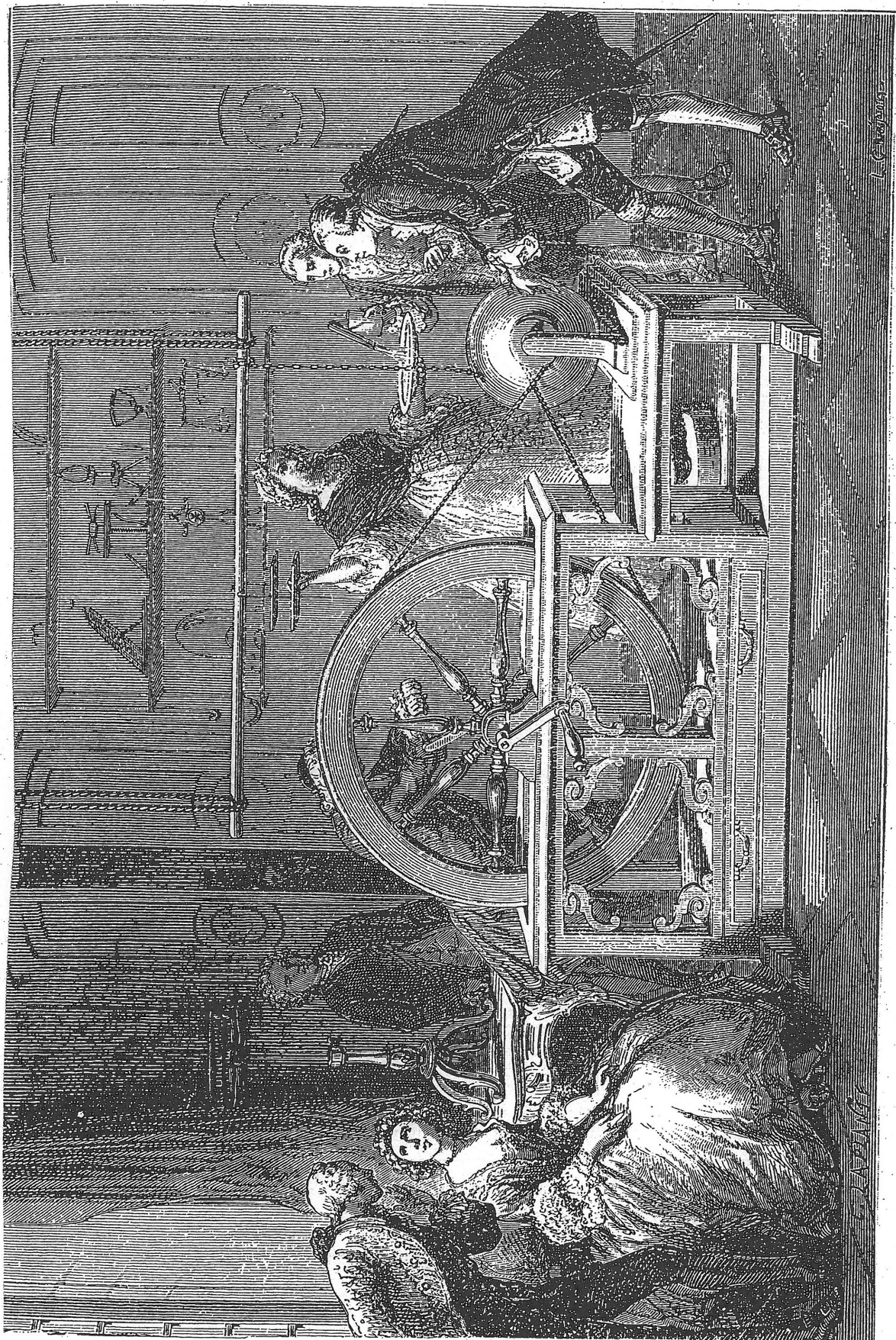


Abb. 1.1.2: Elektrisiermaschine des Abbé Nollet (nach LaCour/Appel). Mit Hilfe eines großen Schwungrades wird eine auf einer waagerechten Achse drehbar gelagerte Glaskugel in rasche Rotation versetzt. Ein – leitend mit der Erde verbundener - Experimentator drückt seine Hände gegen die rotierende Kugel, wodurch diese elektrisch geladen wird. Zur Verbesserung der Wirkungsweise kann statt der bloßen Hände ein „Reibzeug“ aus Leder verwendet werden. Die „Elektrizität“ der Kugel wird über eine senkrecht hängende Eisenkette zum waagerecht aufgehängten „Konduktor“ - einem Metallrohr, das an Seidenfäden befestigt ist – geleitet. Vom Konduktor aus kann die „Elektrizität“ dann zu weiteren Demonstrationsversuchen abgegriffen werden.

Im Laufe der Zeit wurden viele solcher Maschinen konstruiert, die im Grunde alle darauf beruhten, dass ein mit dem Erdboden in leitender Verbindung stehender Experimentator seine Hände gegen eine rotierende Glaskugel drückte und diese Kugel dadurch elektrisch geladen wurde. Über eine Eisenkette war die Kugel leitend mit einem sogenannten „Konduktor“ verbunden, einem an (elektrisch isolierenden) Seidenfäden aufgehängten Metallrohr. Dieses Rohr wurde auf diese Weise elektrisch geladen, sodass bei Berührung dieses „Konduktors“ durch einen Menschen weitere eindrucksvolle Effekte demonstriert werden konnten.

Die Untersuchungen von Guericke wurden einige Jahrzehnte später (ca. 1725) durch Stephen GRAY (1696 - 1736) fortgeführt. Gray fand heraus, dass es Körper aus verschiedenen Materialien gibt, wie z.B. Metalldrähte und Hanfschnüre, welche die Elektrizität gut leiten, dass es aber auch andererseits Materialien gibt, welche die Elektrizität nur sehr schlecht leiten, z.B. Fäden aus Seide. Die vorhandenen Stoffe konnten also in zwei Kategorien eingeteilt werden, in „gute Leiter“ und in „schlechte Leiter“. Gute Leiter sind unter anderem Metalle, Kohle, Salzlösungen, Leim, Baumwolle und der menschliche Körper. Schlechte Leiter sind beispielsweise Bernstein, Harz, Schwefel, Gummi, Wachs, Glas, Porzellan, Leder, Wolle, trockenes Holz und trockene Luft. Zur Vermeidung von Missverständnissen bei den von Gray und Gilbert verwendeten

Formulierungen muss betont werden, dass diejenigen Stoffe, die Gilbert „elektrisch“ nannte, von Gray als „schlechte Leiter“ bezeichnet wurden, und dass die von Gilbert als „unelektrisch“ bezeichneten Materialien diejenigen sind, die Gray „gute Leiter“ nannte. Die Bezeichnungsweise von Gray verwenden wir noch heute: Diejenigen Materialien, die durch Reiben „elektrisch geladen“ werden können, sind in unserem Sprachgebrauch „Isolatoren“, gute Leiter (wie z.B. Metalle) lassen sich durch Reiben nicht in einen – gegenüber der Umgebung – elektrisch geladenen Zustand versetzen.

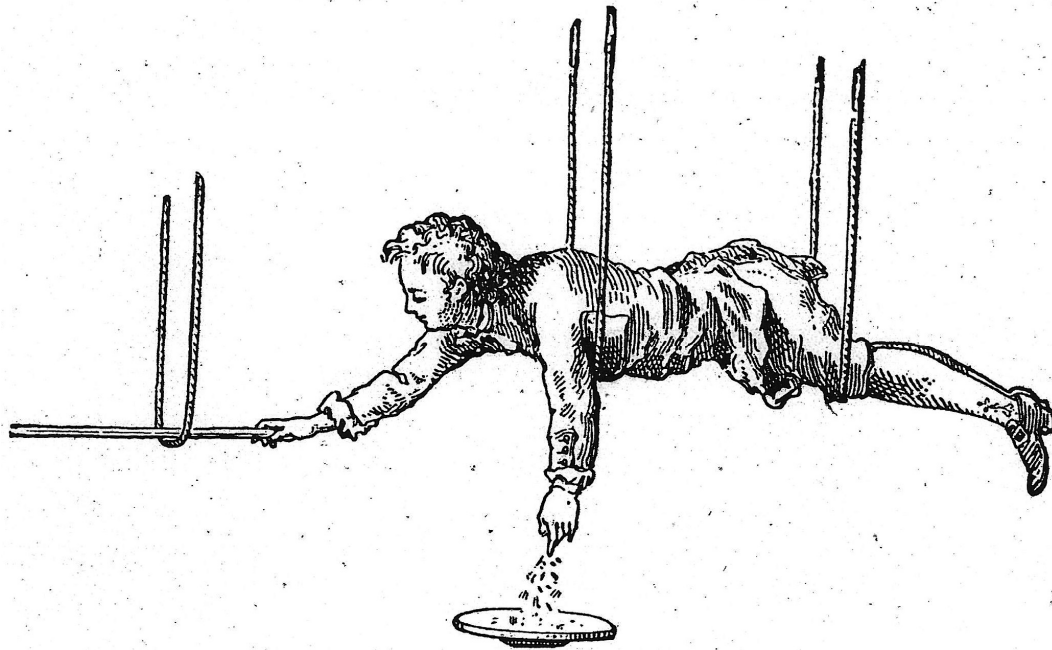


Abb. 1.1.3: Schauversuch von Stephen Gray zur Demonstration der elektrischen Leitfähigkeit des menschlichen Körpers (nach LaCour/Appel).

Ein Junge wird durch elektrisch isolierende Seidenfäden waagrecht in der Luft gehalten und berührt mit der ausgestreckten Hand einen elektrisch geladenen Glasstab. In der Nähe der anderen Hand des Jungen befinden sich Papierschnitzel, die – ohne jede Berührung – von den elektrischen Kräften angezogen werden, die durch den Körper hindurch wirken.

Die hier geschilderten Untersuchungen – von Gilbert über Guericke bis Gray – beschreiben die beobachteten Phänomene, eine (wenn auch nur ansatzweise) Deutung konnte nicht gegeben werden. Ein Zeitgenosse von Gray – Charles François de Esternay DUFAY (1698 -1739) – griff die Versuche von Guericke in modifizierter Form auf. Dufay nahm statt der Flaumfeder wie bei Guericke ein kleines Goldplättchen und einen geriebenen Glasstab. Das Goldplättchen wurde vom Glasstab angezogen und konnte nach Berührung schwebend in der Luft gehalten werden. Näherte man dann dem Goldplättchen ein Stück Harz, das kräftig gerieben worden war, so wurde das Goldplättchen von dem geriebenen Harzkörper kräftig angezogen. Dieses experimentelle Ergebnis widersprach vollständig den damaligen Vorstellungen. Auf der Grundlage dieser Vorstellungen hätte man erwarten müssen, dass das Goldplättchen (nach Gilbert ein Körper aus „unelektrischem“ Material) durch den geriebenen Harzkörper (nach Gilbert einem „elektrischen“ Körper) abgestoßen werden müsste – genau so wie die Flaumfeder im Versuch von Guericke nach Berührung mit der geladenen Schwefelkugel abgestoßen wird.

Zur Erklärung des unerwarteten experimentellen Ergebnisses entwickelte Dufay folgende Vorstellung: Es gibt zwei Arten von Elektrizität, die „Glaselektrizität“ (die wir heute elektrisch positive Ladung nennen), und die „Harzelektrizität“ (die wir heute elektrisch negative Ladung nennen). Körper „gleicher Elektrizität“ stoßen sich ab, und Körper „ungleicher Elektrizität“ ziehen sich an. Diese Deutung von Dufay ist zunächst eine überraschende Theorie. Für einen Schüler von heute kann man diese Vorstellung dadurch verständlich machen, dass man auf die bekannte Erfahrung mit Dauermagneten verweist. Auch dort ist es so, dass wir bei Magneten anziehende und abstoßende Kräfte beobachten; wir deuten dieses Phänomen in der Weise, dass wir zwei unterschiedliche Arten von Magnetpolen einführen und dann sagen, dass zwischen gleichen Magnetpolen abstoßende und zwischen ungleichen Magnetpolen anziehende Kräfte wirken.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen konnte „Elektrizität“ mit Hilfe einer Elektrisiermaschine bereit gestellt und dann für weitere Demonstrationen verwendet werden, es war jedoch nicht möglich die verfügbare Elektrizität zu speichern. Diese Schwierigkeit konnte durch eine bedeutende Entdeckung behoben werden, welche fast gleichzeitig durch den Domherren E.G. von KLEIST in Cammin in Pommern und durch den holländischen Professor Pieter van MUSSCHENBROEK in Leiden gemacht wurde (um 1745).

Der Vorgang der Speicherung von Elektrizität, wie sie damals erfolgte, soll kurz beschrieben werden. Versucht man zunächst die von einer Elektrisiermaschine gelieferte Elektrizität in einer mit Wasser gefüllten Flasche durch Einführen eines Metalldrahtes zu speichern, so gelingt dies nicht. Wird jedoch die Flasche auf der Innen- und Außenseite mit Stanniol ausgekleidet und verbindet man anschließend den Konduktor der Elektrisiermaschine leitend mit der Innenseite der Flasche und die Außenseite der Flasche mit der Erde, so lässt sich eine große Menge Elektrizität in der Flasche speichern.

Eine wichtige Versuchsbedingung soll nochmals deutlich hervorgehoben werden: Das auf der Außenseite der Flasche befindliche Stanniol muss leitend mit der Erde verbunden sein. Beim Laden der Flasche entsteht auf diese Weise ein geschlossener elektrischer Leiterkreis, da bei der Elektrisiermaschine der eine Pol ebenfalls leitend mit der Erde verbunden ist. Nach seiner Vorgeschichte wird dieses Gerät, das wir heute „Kondensator“ nennen, auch als „Kleist’sche Flasche“ oder „Leidener Flasche“ bezeichnet. Die Bedeutung dieser Entdeckung liegt darin, dass mit diesem Gerät und durch das Zusammenschalten mehrerer Kleist’scher Flaschen große Mengen an „Elektrizität“ gespeichert werden können, was zuvor nicht möglich war; damit wurde das Tor für viele neue Versuche geöffnet.

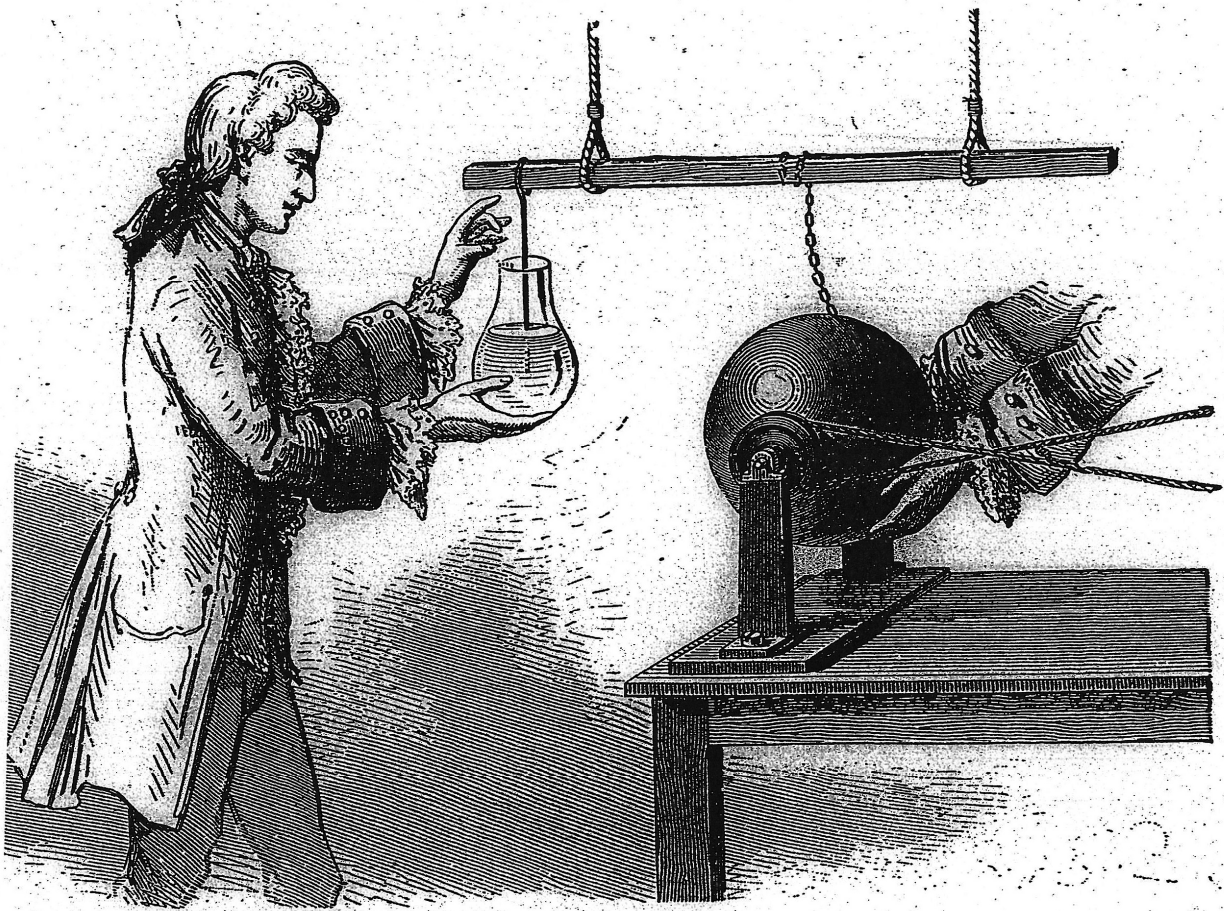


Abb.1.1.4: Zur Entdeckung von Aufbau und Wirkungsweise einer Leidener Flasche (nach LaCour/Appel).

Die rotierende Kugel der Elektrisiermaschine ist elektrisch leitend mit dem an seidenen Fäden hängendem Metallrohr (dem „Konduktor“) verbunden; von diesem führt ein Nagel in ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß. Der Experimentator berührt das Glasgefäß mit einer Hand an dessen Außenfläche und stellt damit über seinen Körper eine leitende Verbindung zur Erde her. Da auch der andere Pol der Elektrisiermaschine geerdet ist (durch einen weiteren Experimentator, der seine Hände an die rotierende Kugel drückt; rechts im Bild) entsteht ein geschlossener Leiterkreis – der Experimentator erhält einen kräftigen elektrischen Schlag.

Bisher wurden in diesen Ausführungen beeindruckende Versuche vorgestellt, die man mit Elektrisiermaschinen und Leidener Flaschen durchführen kann. Es gab jedoch keine Antwort auf die Frage, welche Vorstellungen man – vom naturwissenschaftlichen

Aspekt aus gesehen – mit dem Wort „Elektrizität“ verbinden soll. In den Anfängen der historischen Entwicklung gab es die vage Idee von einem „elektrischen Fluidum“, also einer „elektrischen Flüssigkeit“, die nach dem Reiben einiger Körper auf diesen vorhanden sein sollte. Die Frage, woher dieses Fluidum kommen könnte, wie es entsteht oder wie man gar die Menge dieser „elektrischen Flüssigkeit“ messen könnte, blieb unbeantwortet. Einen wesentlichen Beitrag in Richtung einer Klärung dieser Frage brachten die experimentellen Forschungen von Charles Auguste de COULOMB (1736 - 1806). Nachdem bereits andere Naturwissenschaftler der damaligen Zeit (Joseph PRIESTLEY und Henry CAVENDISH) die Vermutung geäußert hatten, dass „elektrische Körper“ aufeinander eine Kraft ausüben, die mit dem Quadrat der Entfernung kleiner wird, ist es das große Verdienst von Coulomb, diese Frage mit einer von ihm entwickelten Drehwaage untersucht und geklärt zu haben. In vorausgegangenen Untersuchungen hatte Coulomb gefunden, dass bei der Torsion von Metalldrähten das wirkende Drehmoment dem Drehwinkel direkt proportional ist. Gestützt auf diese Erkenntnisse konnte Coulomb die oben geäußerte Vermutung experimentell bestätigen. Damit war auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre 1789 ein Gesetz formuliert worden, das in seiner mathematischen Form genau dem Newton'schen Gravitationsgesetz entspricht. Die Abstandsabhängigkeit der wirkenden elektrischen Kräfte konnte Coulomb direkt zeigen, den quantitativen Zusammenhang mit den Größen, die wir heute die elektrischen Ladungen nennen, konnte man zur Zeit von Coulomb nicht vollständig erbringen, denn elektrische Ladungen konnten noch nicht gemessen werden. Es war allerdings möglich, mit Hilfe der Vorstellung des „elektrischen Fluidums“ die Größe von „Elektrizitätsmengen“ zu vergleichen. Der Weg ist der folgende: Befindet sich auf einer isolierten Metallkugel eine bestimmte „Elektrizitätsmenge“, so kann man diese Kugel mit einer gleich großen elektrisch neutralen Kugel in Kontakt bringen, die beiden Kugeln dann trennen und gemäß den Eigenschaften des

„elektrischen Fluidums“ begründet vermuten, dass sich danach auf beiden Kugeln jeweils eine gleich große Elektrizitätsmenge (nämlich die Hälfte der ursprünglichen Elektrizitätsmenge) befindet. Auf der Grundlage dieser Überlegungen ist es möglich, das Coulomb'sche Gesetz auch bezüglich der Proportionalität der beteiligten Elektrizitätsmengen experimentell zu bestätigen. Ferner wies Coulomb nach, dass sich bei elektrisch geladenen metallischen Körpern die „wirkende Elektrizität“ nur an deren Oberfläche befindet. Eine mathematisch beweisbare Folgerung aus dieser Tatsache besteht darin, dass man bei der Berechnung der zwischen zwei elektrisch geladenen Metallkugeln wirkenden Kräfte so verfahren kann als wäre die gesamte elektrische Ladung im Kugelmittelpunkt konzentriert.

Diese Kenntnisse weisen über Coulomb hinaus und eröffnen die Möglichkeit zu einer – mindestens prinzipiellen – Messmöglichkeit der elektrischen Ladung auf der Grundlage des Coulomb'schen Gesetzes. Setzt man in dem Coulomb'schen Gesetz die der Gravitationskonstanten entsprechende Konstante gleich 1, so kann man folgende Definition treffen:

Die Einheit der elektrischen Ladung liegt bei
jeder der beiden Ladungen dann vor, wenn
zwischen zwei punktförmigen gleichen
Ladungen im Abstand von 1 cm die Kraft
1 dyn wirkt.

Auf diese Weise ist es möglich, ein Messverfahren für elektrische Ladungen auf der Grundlage der Elektrostatik einzuführen, was mit der sogenannten „elektrostatischen Einheit“ auch geschehen ist (1 dyn entspricht $1 \cdot 10^{-5}$ N; $3 \cdot 10^9$ elektrostatische Einheiten entsprechen 1 C).

Mit diesem Ausblick kann unsere Betrachtung über die historische Entwicklung dieses Teiles der Elektrizitätslehre beendet werden. Der weitere Weg führt von den ruhenden Ladungsträgern weg zu strömenden Ladungsträgern, also von der Elektrostatik zur Stromkreislehre.

2. Von der Stromkreiselektrik zur Vorstellung einer elektrischen Struktur der Materie

Das zentrale Thema der vorausgegangenen Betrachtungen war die „ruhende Elektrizität“, also ein Teilgebiet der Physik, das wir heute als Elektrostatik bezeichnen. Mit dem Coulomb'schen Gesetz und dem Begriff der elektrischen Ladung waren diese Überlegungen am Ende des 18. Jahrhunderts zu einem gewissen Abschluss gekommen. Nicht untersucht werden konnte mit den damals verfügbaren experimentellen Möglichkeiten das Phänomen „strömende Elektrizität“, denn es fehlte ein Gerät, welches die Elektrizität in Bewegung setzen und diese Bewegung aufrecht erhalten konnte. Das große Verdienst, ein solches Gerät erfunden zu haben, gebührt Alessandro VOLTA (1745 – 1827). Er knüpfte an die Untersuchungen von Luigi GALVANI an (1737 -1798) und gelangte auf Grund seiner Ergebnisse zu der Überzeugung, dass die Ursache für den sogenannten „Galvanismus“ (in unserer heutigen Ausdrucksweise ist damit die Bewegung elektrischer Ladungsträger gemeint) nicht im tierischen Muskelgewebe liegt (wie Galvani meinte), sondern in der leitenden Verbindung von zwei unterschiedlichen Metallen. Im Jahre 1800 gelang Volta seine große Erfindung: Die Herstellung der ersten elektrischen Batterie. Diese besteht aus einer Kupfer- und einer Zinkplatte, zwischen denen sich eine in eine wässrige Salzlösung getauchte Scheibe aus Pappe oder Leder befindet. Volta schaltete mehrere solcher „Elemente“ zusammen und erhielt auf diese Weise die „Volta'sche Säule“, also in unserem heutigen Sprachgebrauch eine Batterie, die eine Spannung von ungefähr 30 V bereitstellte. Volta konnte mit den damals verfügbaren Messgeräten zeigen, dass das eine Ende der Säule elektrisch negativ und das andere elektrisch positiv geladen war. Das Neue an Voltas Erfindung war jedoch, dass beim Experimentieren mit der Säule Effekte auftraten, die nicht mehr mit „ruhender Elektrizität“ gedeutet werden konnten - man musste zur Erklärung ein „Strömen der Elektrizität“ annehmen. Als qualitatives Nachweisgerät für das „Strömen von Elektrizität“

diente Volta der menschliche Körper; berührt man mit der einen Hand das eine und mit der anderen Hand das andere Ende der Säule, so spürt man ein prickelndes Gefühl in den Händen so lange die Berührung andauert. Unterbricht man den Kontakt, so endet diese Empfindung sofort. Volta teilte noch im Jahre 1800 seine Erfindung der Royal Society in einer in französischer Sprache geschriebenen Abhandlung mit und empfing für seine wissenschaftliche Leistung hohe Ehrungen.



Abb. 1.2.1: Alessandro VOLTA (1745 – 1827) (nach LaCour/Appel).

Voltas Erfindung fand große Beachtung. Viele andere Wissenschaftler beschäftigten sich mit dem neuen Gerät, und so wurde nach kurzer Zeit eine Entdeckung gemacht, die das Strömen der Elektrizität mit einem Laborgerät (statt des menschlichen Körpers) demonstrierte. In Wien verband LANDRIANI die Enden der Säule mit zwei Drähten und führte diese in ein mit Wasser gefülltes Gefäß. Die Folge war eine deutlich wahrnehmbare Gasentwicklung. Bei Verwendung von Elektroden aus Platin konnte J.W. RITTER kurz darauf zeigen, dass auf diese Weise Wasser in seine chemischen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden kann.

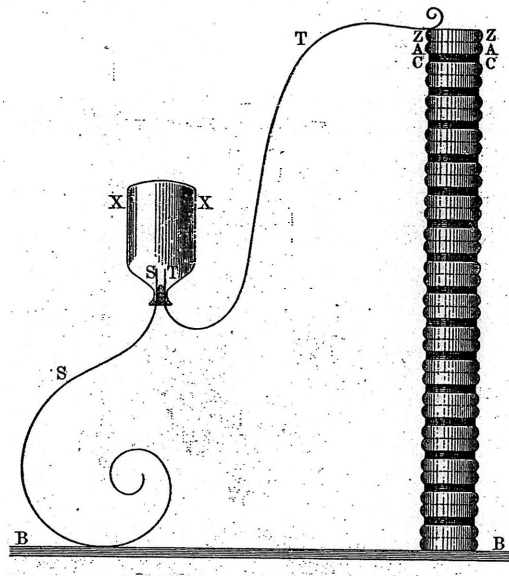


Abb. 1.2.2: Zum qualitativen Nachweis des „Strömens von Elektrizität“ (nach LaCour/Appel).

Verbindet man die Enden einer Volta'schen Säule mit zwei Drähten aus Cu und aus Zn und taucht diese Drähte dann in ein Gefäß mit Wasser, so kann man eine Gasentwicklung beobachten, die als Indiz für das „Strömen von Elektrizität“ angesehen werden kann.

Ein Wissenschaftler, der durch Voltas Erfindung zu einer großen Entdeckung geführt wurde, war Hans Christian OERSTED (1777 – 1851). Er beschäftigte sich intensiv mit der Entladung der Volta'schen Säule über Drähte und machte dabei

im Jahre 1820 eine Entdeckung, welche die Tür zu einem weiteren Teilgebiet der Physik öffnete: Oersted stellte fest, dass eine Magnetnadel, die sich in der Nähe eines geraden Leiters befand, bei Stromfluss abgelenkt wurde. Damit war ein Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen gefunden worden, es war die Geburtsstunde des Elektromagnetismus.

Oersteds Entdeckung regte viele andere Forscher zu weiterer Tätigkeit an. Kurz nach Bekanntwerden des Einflusses der strömenden Elektrizität auf eine Magnetnadel stellte André – Marie AMPÈRE (1775 – 1836) eine Regel auf (die „Ampère’sche Regel), mit deren Hilfe die Richtung der Ablenkung der Magnetnadel aus der Richtung der „bewegten Elektrizität“ bestimmt werden konnte. Weiter beobachtete Ampère, dass zwischen stromdurchflossenen geraden Leitern anziehende und abstoßende Kräfte auftreten. Er stellte eine Theorie auf, welche die diesbezüglichen magnetischen Kräfte auf strömende elektrische Ladungen zurück führt („Recueil d’observations électrodynamiques“, Paris 1822) und wurde so der Begründer der Elektrodynamik. Die heutige Definition der Einheit der elektrischen Stromstärke wurde zu Ehren von Ampère nach ihm benannt und lautet in heutiger Fassung:

Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von einem Meter angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern je einem Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.

Eine weitere große Leistung von Ampère bezieht sich auf die Deutung des Permanentmagnetismus. Er führte dieses Phänomen darauf zurück, dass er die Existenz von „Molekularströmen“ im Inneren von Dauermagneten annahm. Wenn man bedenkt, dass in der Zeit um 1800 erste Ansätze einer Atomvorstellung von John

DALTON auf Grund seiner chemischen Untersuchungen geäußert wurden, so kann man erahnen, wie weit Ampère seiner Zeit voraus war.

Von den Physikern, die Großes zur Entwicklung der Stromkreiselektrik beigetragen haben, ist Georg Simon OHM (1789 – 1854) zu nennen. Mit seinem Namen verbindet man die nach ihm benannte Einheit des elektrischen Widerstandes und das von ihm formulierte „Ohm'sche Gesetz“ (1826). Dieses Gesetz besagt, dass die Stromstärke in einem Elektrogerät dann linear mit der angelegten Spannung wächst, wenn dabei die Temperatur des Leiters konstant bleibt. Dies ist gleichbedeutend mit der Feststellung, dass sich in diesem Fall der elektrische Widerstand des betrachteten Leiters nicht ändert. Um dieses Gesetz zu finden hatte Ohm unvorstellbare experimentelle Schwierigkeiten zu überwinden - eine Aufgabe, die er mit größtem Geschick meisterte. Die historische Leistung von Ohm liegt jedoch nicht nur in dem von ihm gefundenen gesetzmäßigen Zusammenhang, sondern darin, dass er die Begriffe elektrische Spannung, Stromstärke und elektrischer Widerstand klar herausarbeitete und so einen unschätzbaren Beitrag zur Errichtung des Gedankengebäudes der Elektrizitätslehre leistete.

Bei der Betrachtung der historischen Entwicklung der Physik kann man die Frage stellen, welche Vorkommnisse dazu führten, dass sich Forscher mit bestimmten Fragestellungen beschäftigten. Bei Michael FARADAY (1791 – 1867) kann man diese Frage beantworten. Nachdem Oersted gefunden hatte, dass elektrische Vorgänge magnetische Wirkungen zeigen, stellte Faraday die Frage, ob nicht umgekehrt magnetische Vorgänge elektrische Wirkungen hervor rufen könnten. Seine unermüdlichen Forschungen führten ihn 1831 zur Entdeckung der elektromagnetischen Induktion. Das Auffinden dieses grundlegenden Zusammenhanges zwischen magnetischen und elektrischen Prozessen hatte für die Entwicklung der angewandten Naturwissenschaften und der Technik eine kaum zu überschätzende Bedeutung. Auf diesem Gesetz beruht die

Funktionsweise von Generatoren und Transformatoren, also von zwei Geräten, die für die Bereitstellung von elektrischer Energie im großtechnischen Maßstab entscheidend waren. Daneben verdient eine weitere Leistung Faradays größten Respekt, nämlich die Einführung des Feldbegriffes zur Beschreibung elektrischer und magnetischer Kräfte.

Die bisherigen Ausführungen zeigten, dass elektrische und magnetische Phänomene sehr eng miteinander verbunden sind. Es ist die Leistung von James Clerk MAXWELL (1831 - 1879) diesen Zusammenhang in seiner vollen Tragweite erkannt und in den „Maxwell’schen Gleichungen“ mathematisch formuliert zu haben (1862). In seinen Arbeiten kann Maxwell das von Faraday gefundene Gesetz der elektromagnetischen Induktion auf die Auswirkungen eines sich im Laufe der Zeit ändernden magnetischen Feldes zurückführen. Weiter geht Maxwell über Faraday hinaus, indem er postuliert, dass ein sich im Laufe der Zeit änderndes elektrisches Feld von einem Magnetfeld begleitet ist. Diese Gleichungen zeigen eine große Symmetrie zwischen elektrischen und magnetischen Feldern und führen in ihrer Konsequenz zum Phänomen der elektromagnetischen Wellen, deren Existenz einige Jahre später durch Heinrich HERTZ (1857 - 1894) experimentell bestätigt werden konnte (1886).

Wirft man an dieser Stelle einen Blick zurück auf die Entwicklung der Elektrizitätslehre – angefangen vom geriebenen Bernstein bis zu den Maxwell’schen Gleichungen – so ist im Gedankengebäude der Physik eine gewaltige Entwicklung zu bewundern. Es bleibt aber noch ein Problem zurück, auf das es bis dahin keine zufriedenstellende Antwort gab, nämlich die Frage:

Was kann man sich unter dem Wort „Elektrizität“ vorstellen?

Ein Anstoß in Richtung einer Antwort erfolgte als man begann sich mit der elektrischen Leitfähigkeit von Gasen zu befassen. Normalerweise sind Gase ein elektrischer Isolator, doch wenn man den Druck eines Gases (in einem abgeschlossenen Gefäß) sehr stark verkleinert und zwischen zwei Metallelektroden eine Spannung von einigen Tausend Volt anlegt, so wird das Gas

leitend und man beobachtet bemerkenswerte Effekte. Einer dieser Effekte ist das Auftreten einer bis dahin unbekannten Strahlung, welche von der elektrisch negativen Elektrode (nämlich der Kathode) ausgeht. Die Untersuchung dieser „Kathodenstrahlen“ zeigte, dass sie sich geradlinig ausbreiten (HITTORF, 1869) und dass sie durch Magnetfelder abgelenkt werden können. Dies deutete darauf hin, dass es sich bei den „Kathodenstrahlen“ um elektrisch geladene Teilchen großer Geschwindigkeit handeln könnte. Den experimentellen Nachweis in dieser Richtung erbrachte im Jahre 1895 Jean Baptiste PERRIN (1870 - 1942); er lenkte die Strahlen durch ein Magnetfeld in einen Faraday'schen Becher und konnte mit Hilfe eines angeschlossenen Spannungsmessers zeigen, dass es sich nicht um eine Wellenstrahlung, sondern um eine Korpuskelstrahlung (bestehend aus elektrisch negativ geladenen Teilchen) handelt. Auf Vorschlag von Goldstein wurden diese Teilchen mit dem Namen „Elektronen“ belegt.

Nach den Arbeiten von Perrin blieben allerdings noch folgende Fragen offen:

- Wie groß ist die elektrische Ladung der Teilchen?
- Wie groß ist die Masse der Teilchen?
- Woher stammen die Teilchen?

Es ist das Verdienst von Joseph John THOMSON (1856 – 1940) wesentlich zur Klärung dieser Fragen beigetragen zu haben. J.J. Thomson gelang zunächst der noch ausstehende Nachweis, dass die Teilchen der fraglichen Strahlung nicht nur durch magnetische Felder, sondern auch durch elektrische Felder abgelenkt werden können (was bis dahin nicht erreicht worden war, da für diese Experimente kein hinreichend gutes Vakuum zur Verfügung stand). J.J. Thomson gelang es 1897 durch ein besonderes Experiment (mit dem sogenannten „Fadenstrahlrohr“) den Quotienten aus Ladung und Masse bei den Elektronen der Kathodenstrahlung zu bestimmen. Das Ergebnis war höchst überraschend, denn der gemessene Wert erwies sich als erstaunlich groß. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass die

Ladung dieser Elektronen entweder außerordentlich groß oder ihre Masse sehr klein sein muss. J.J. Thomson lagen damals die Forschungsergebnisse über Ionenleitung in Flüssigkeiten vor; aus diesen Kenntnissen und aus den Aussagen der kinetischen Gastheorie (in Zusammenhang mit der Avogadro – Konstanten) konnte man die Größe der Ionenladung abschätzen. J.J. Thomson neigte zu der Auffassung, dass die elektrische Ladung der Elektronen in der gleichen Größenordnung liegen müsse wie die Ionenladung. Daraus folgt, dass die Masse der Elektronen verschwindend klein sein muss. Nach Abschätzung von J.J. Thomson betrug die Masse eines Elektrons ungefähr ein Tausendstel der Masse eines Wasserstoffatoms. Einige Jahre später konnte Robert Andrews MILLIKAN (1868 - 1953) die Ladung der Elektronen messen (1909 bis 1913). Mit Hilfe des durch J.J. Thomson bestimmten Wertes von e/m war damit auch die Masse des Elektrons bekannt ($m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$).

Damit war sehr viel geklärt worden, allerdings blieb die Antwort auf die Frage nach der Herkunft der Elektronen noch offen. Eine Antwort konnte 1897 mit Hilfe des Zeemann-Effektes gefunden werden. Bei diesem Effekt werden Spektrallinien durch starke Magnetfelder aufgespalten, und man kann daraus einen Wert von e/m herleiten, welcher mit dem bei Kathodenstrahlen ermittelten Wert übereinstimmt. Nimmt man an, dass bei chemischen Elementen die Aussendung von Spektrallinien durch die Struktur der Atome bestimmt wird, so lässt sich daraus der Schluss ziehen, dass die Elektronen der Kathodenstrahlen ebenfalls aus Atomen stammen. Hiermit ist nicht nur die oben gestellte Frage beantwortet, sondern es ergibt sich auch eine weitreichende Folgerung für die Vorstellung von der Struktur der Atome. Auf Grund der Annahmen der kinetischen Gastheorie stellte man sich Atome als massive, ideal elastische kleine Kügelchen vor. Als Folge der hier geschilderten Ergebnisse musste diese Vorstellung revidiert werden. Nach dem „Thomson’schen Atommodell“ musste man sich von Atomen ein anderes Bild machen: Die homogenen Kügelchen wurden ersetzt durch eine Art „Brei“, der elektrisch positiv geladen sein sollte und in welchem die negativ

geladenen Elektronen eingebettet waren. Man stellte sich jetzt Atome als inhomogene Gebilde vor, die elektrische Ladungen beiderlei Vorzeichens enthalten sollten und nach außen hin elektrisch neutral waren.

Die Vorstellungen von J.J. Thomson wurden weiter untersucht und führten im Jahre 1911 durch Ernest RUTHERFORD (1871 – 1937) zu dessen berühmten Streuversuch. Das wesentliche Ergebnis besagt, dass das Atom aus einem (im Vergleich zum Durchmesser des Atoms) winzigen „Atomkern“ mit positiven Ladungen besteht, und dass sich in dem übrigen Volumen des Atoms Elektronen befinden, deren negative Ladung so groß ist, dass das Atom nach außen hin elektrisch neutral ist. Der Raum, in welchem sich die Elektronen befinden, kann - im Vergleich zu dem mit Materie erfüllten Atomkern - als nahezu leer betrachtet werden.

Versucht man jetzt die eingangs gestellte Frage nach dem Wesen der „Elektrizität“ zu beantworten, so kann man auf die elektrische Struktur der Materie verweisen. Diese Materie besteht aus elektrisch positiv und negativ geladenen Bausteinen, die durch geeignete Vorgänge getrennt werden können, unterschiedliche Beweglichkeit besitzen und auf diese Weise nach außen hin als „elektrisch geladene Körper“ in Erscheinung treten. „Elektrizität“ ist dabei eine Grundeigenschaft dieser Bausteine, die diesen anhaftet und untrennbar mit ihnen verbunden ist.

Eine weitere Folgerung aus der Elektrizitätslehre im allgemeinen und aus den Maxwell'schen Gleichungen im besonderen verdanken wir Albert EINSTEIN (1879 - 1955). In seiner im Jahre 1905 erschienenen Abhandlung „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (Annalen der Physik, 1905) weist er zu Beginn darauf hin, dass „einige Unsymmetrien bei elektrodynamischen Vorgängen“ den Ausgangspunkt für seine Gedankengänge lieferten, die dann zur Aufstellung der speziellen Relativitätstheorie führten. Gemeint ist damit das folgende experimentelle Ergebnis: Ruht ein gerader stromdurchflossener Leiter in einem Bezugssystem, so bewegen sich in dem Leiter

Ladungsträger, und die Folge davon ist (nach Oersted) ein im Bezugssystem des Beobachters ruhendes Magnetfeld. Bewegt sich weiter ein Ladungsträger (z.B. ein Elektron) parallel zu dem Leiter mit der gleichen Geschwindigkeit, welche die Ladungsträger im Leiter besitzen, so wirken insgesamt auf das Elektron die elektrostatischen Coulomb – Kräfte und die Lorentz – Kraft (diese auf Grund der Relativbewegung des Elektrons bezüglich des im Bezugssystem des Beobachters ruhenden Magnetfeldes).

Jetzt erfolgt (nach Einstein) eine zweite Betrachtung dieser Konstellation von einem anderen Bezugssystem aus. Der gerade Leiter (mit den darin befindlichen Ladungsträgern) und das neben dem Leiter befindliche Elektron sollen die gleiche relative Lage zueinander besitzen, der Beobachter bewege sich relativ zum geraden Leiter mit der betragsmäßig gleichen Geschwindigkeit mit welcher sich bei der ersten Betrachtungsweise der Situation die Ladungsträger und das Elektron bewegten. In diesem Fall stellt der Beobachter die Wirkung der statischen Coulomb – Kräfte fest, jedoch existiert für diesen Beobachter die Lorentz – Kraft nicht.

Diese von Einstein erwähnte „Unsymmetrie“ kann behoben werden, wenn man auf die Maxwell’schen Gleichungen zurück greift und bei dem Wechsel der Bezugssysteme eine Lorentz – Transformation vornimmt. Eine weiter gehende Betrachtung zeigt, dass die Maxwell’schen Gleichungen gegenüber einer Lorentz – Transformation invariant sind. Die tiefer liegenden Gründe für diese Sichtweise legt Einstein in der speziellen Relativitätstheorie dar. Ein wesentlicher Punkt dabei ist die Erkenntnis, dass beim Übergang von einem Bezugssystem zu einem anderen (genauer: beim Übergang zwischen zwei Inertialsystemen) nicht nur die Raum-, sondern auch die Zeitkoordinaten transformiert werden müssen. Dabei wird die Lichtgeschwindigkeit als eine in allen Inertialsystemen gleich große und nicht überschreitbare Größe angenommen. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass (nach Einstein) Raum und Zeit nicht mehr absolut gegeben sind, sondern dass die diesbezüglichen Messergebnisse vom jeweiligen

Bezugssystem abhängen. Dieser Umsturz im Weltbild führte zu teilweise sehr heftigen Auseinandersetzungen, besonders auch auf dem Gebiet der Philosophie. Nach heutiger Sicht ist die spezielle Relativitätstheorie ein durch Experimente gesicherter Bestandteil der Physik, der seine Wurzeln in der Elektrizitätslehre hat.

3. Anwendung naturwissenschaftlicher Ergebnisse

Die Untersuchungen über Elektrizität und Magnetismus erschlossen ein völlig neues Wissensgebiet. Neben vielen grundlegend neuen Erkenntnissen bestand eine wichtige Einsicht darin, dass elektrische und magnetische Felder Träger von Energie sein können. Weiter kann sich elektrische Energie ausbreiten wenn Ladungsträger strömen. Diese Erkenntnisse verbinden sich mit der Frage wie elektrische Energie bereit gestellt und genutzt werden kann. Die Entwicklung führte zu demjenigen Anwendungsgebiet, das wir als „elektrische Energietechnik“ bezeichnen.

Noch ein anderes Phänomen der Elektrik hatte für das Leben der Menschen weitreichende Konsequenzen. Die Tatsache, dass sich beim Öffnen und Schließen eines elektrischen Leiterkreises das dabei ausgesandte Signal im Leiterkreis mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet kann als Grundlage einer Nachrichtenübertragung genutzt werden. Auf dieser Basis entstand der neue Zweig der „Nachrichtentechnik“.

3.1 Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie

Der Energiesatz sagt aus, dass man Energie weder aus dem Nichts heraus erzeugen noch vernichten kann, sondern dass es lediglich möglich ist, Energie von einer Form in eine andere umzuwandeln. Hält man sich streng an diese Formulierung, so folgt daraus, dass man elektrische Energie nur dadurch bereit stellen kann, dass man eine in irgendeiner Form vorhandene Energie in elektrische Energie umwandelt. Die Grundlage für diesen Prozess bildet der

Generator, ein Gerät, das nach dem Prinzip der elektrischen Induktion mechanische Energie in elektrische umwandelt. Die mechanische Energie ihrerseits wird durch den chemischen Prozess der Verbrennung aus fossilen Brennstoffen (wie beispielsweise Steinkohle oder Erdgas) in thermische Energie umgewandelt; diese sorgt für erhitzten Wasserdampf, der unter hohem Druck eine Turbine treibt, und diese gibt ihre mechanische Energie an den Generator weiter. Diese Abfolge von Prozessen findet in einem „Elektrizitätswerk“ statt, welches man (in der hier angesprochenen Bauart) genauer als „thermo-elektrisches Energieumwandlungswerk“ bezeichnen müsste. Die vom Generator abgegebene Energie wird dann über gewaltige Leitungen (dicke Kabel), in denen sich dem Anschein nach nichts Wahrnehmbares bewegt, zum Abnehmer transportiert. Solche Abnehmer sind z.B. Industriebetriebe oder Haushalte. Hier zeigt sich ein besonderer Vorteil elektrischer Energie: Sie kann besonders leicht in andere Energieformen umgewandelt werden. In einem Elektroherd wird elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt, in einem Elektromotor elektrische Energie in mechanische Energie und in einer Leuchtstoffröhre elektrische Energie in Licht (Strahlungsenergie). Alle diese Geräte und Vorgänge sind den Menschen in einer heutigen Industriegesellschaft geläufig, fast selbstverständlich; es musste dazu jedoch ein langer Entwicklungsprozess durchlaufen werden. Nachfolgend soll dieser beleuchtet werden.

Die Erfindung von Volta eröffnete den Übergang von der Elektrostatik zur Stromkreiselektrik. Dies bedeutete einen gewaltigen Fortschritt hinsichtlich der wissenschaftlichen Forschung; es bestand jedoch ein Problem: Mit einer Batterie lassen sich nur kleine Energien übertragen. Diese Situation änderte sich mit der Entdeckung der elektrischen Induktion durch Faraday (1831), denn dieses Prinzip ist die Grundlage für die Bereitstellung großer elektrischer Energien. Das Gerät, welches diese Aufgabe leistet, ist der Generator. Bereits kurze Zeit nach der Entdeckung Faradays entwickelte ein Mitarbeiter von Ampère

eine Maschine (1832), die aus einem Dauermagneten und einem handgetriebenen rotierenden Teilstück bestand und die als Prototyp eines Generators angesehen werden kann. Ein bedeutsamer Schritt hin zur Entwicklung einer großtechnischen Anlage gelang Werner von SIEMENS (1816 – 1892) mit der Entdeckung des „dynamo-elektrischen Prinzips“ (1866). Dieses beruht darauf, dass an den Polen eines Gleichstromgenerators ein verhältnismäßig schwacher remanenter Magnetismus besteht, welcher beim Starten des Generators in den Wicklungen des Läufers einen Induktionsstrom hervorruft. Dadurch wird das Magnetfeld im Elektromagneten vergrößert, was wiederum zu einer Verstärkung des Induktionsstromes führt. Es entsteht dadurch ein Verstärkungseffekt, der den Generator schließlich zu dessen voller Leistung bringt. Einige Zeit später nahm Thomas A. EDISON (1847 - 1931) in New York das erste öffentliche Elektrizitätswerk in Betrieb (1882). Im Jahre 1891 baute Oskar von MILLER (1855 - 1934) – der Begründer des Deutschen Museums in München - von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main eine Fernleitung zur Übertragung von elektrischer Energie, womit ein bedeutender Schritt in Richtung eines Energietransports über große Entfernungen getan wurde. Diese Entwicklung fand um 1900 mit dem Ausbau von öffentlichen Versorgungsnetzen ihre Fortsetzung. Die Folgezeit ist gekennzeichnet vom Bau leistungsfähiger „Elektrizitätswerke“, also von großtechnischen Anlagen, welche elektrische Energie aus anderen Energieträgern bereit stellen und über große Entfernungen weiterleiten. Das heute in Europa bestehende Verbundsystem hat durch den Zusammenschluss der Elektrizitätswerke mehrerer Staaten eine große Zuverlässigkeit erreicht.

Ein Gerät, welches dazu beigetragen hat, die Nutzung elektrischer Energie zu fördern, ist der Elektromotor – ein Gerät, welches elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt. Michael Faraday baute 1821 einen Apparat, den wir vom heutigen Standpunkt aus als Elektromotor bezeichnen können.

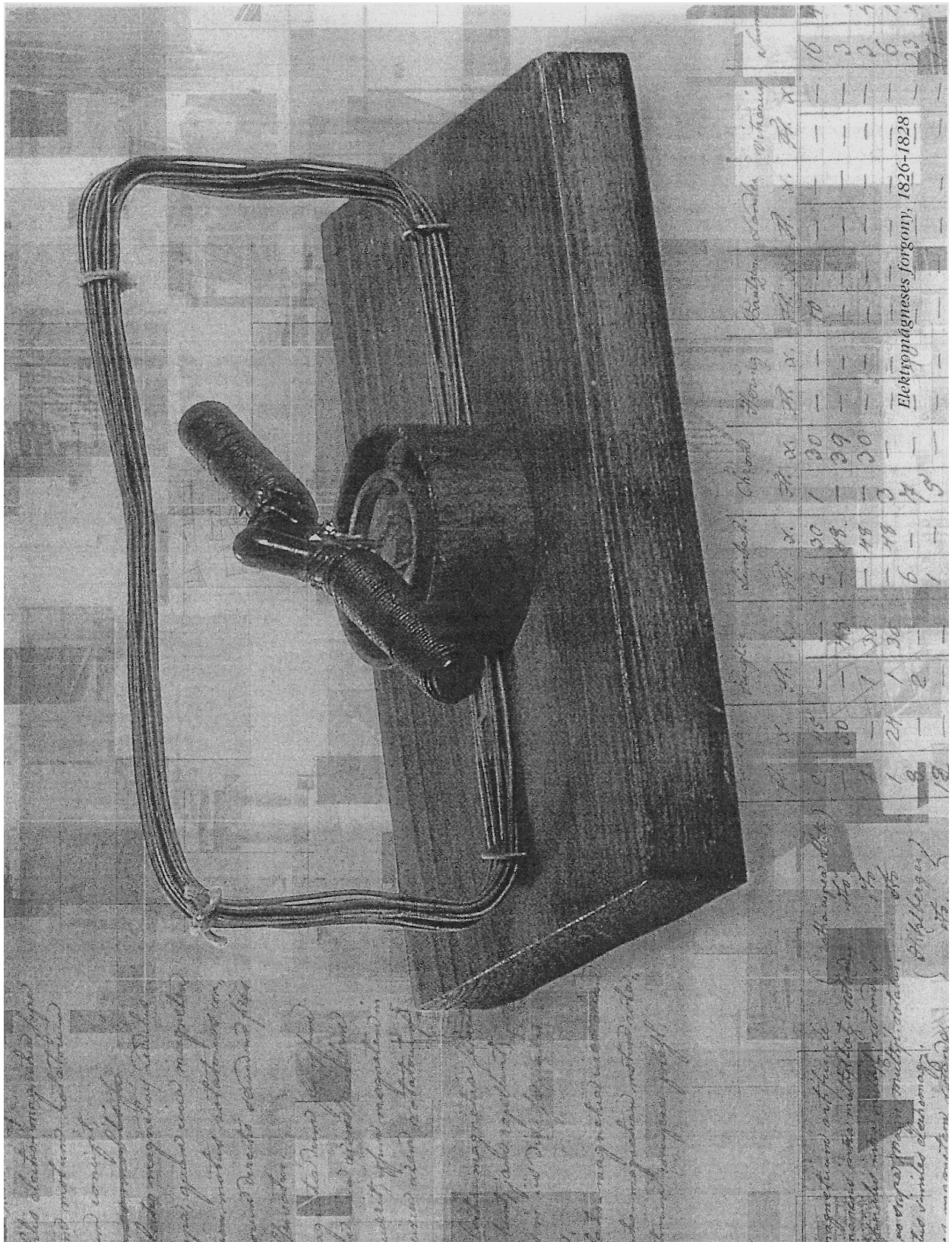


Abb. 1.3.1: Elektromotor von Anyos JEDLIK aus den Jahren 1826 bis 1828.

Die weitere Entwicklung verlief sehr langsam, unter anderem auch deshalb, weil für den Betrieb eines solchen Gerätes die erforderliche elektrische Energie noch nicht in ausreichendem Maße vorhanden war. Erst nach dem Ausbau von weit verzweigten Netzen zur Übertragung von elektrischer Energie (etwa ab 1900) konnte der Elektromotor mit seinen zahlreichen Einsatzmöglichkeiten eine große Verbreitung finden.

Auf Grund der vielseitigen Anwendbarkeit von elektrischer Energie könnte der Eindruck entstehen, diese Energieform besitze nur Vorteile. Dem ist jedoch nicht so, die elektrische Energie besitzt auch einen schwer wiegenden Nachteil: Sie kann (mit vertretbarem Aufwand) in elektrischer Form (beispielsweise in Kondensatoren) **nicht gespeichert werden**. Für großtechnische Anlagen bedeutet dies, dass die Elektrizitätswerke stets so viel Energie bereit stellen müssen wie die Abnehmer verlangen. Der Energiebedarf der Abnehmer ist aber zeitlich nicht konstant, er schwankt innerhalb eines Tages und innerhalb eines Jahres erheblich. Die Energieversorgungsunternehmen begegnen diesem Problem dadurch, dass ein Teil der Generatoren rund um die Uhr in Betrieb ist („Grundlast“) und dass für den Spitzenbedarf zusätzliche Anlagen bereit stehen. Diese müssen in der Lage sein, in sehr kurzer Zeit (innerhalb von etwa einer Minute) die geforderte elektrische Energie bereit zu stellen. Gelöst wird diese Aufgabe durch den Einsatz von mit Gas befeuerten oder von Wasser getriebenen Turbinen; die erst genannten müssen aus entsprechenden Versorgungssystemen und die zweit genannten aus hoch gelegenen Talsperren gespeist werden.

3.2 Übertragung von Nachrichten

Es ist ein alter Wunsch der Menschheit Nachrichten möglichst schnell zu übermitteln. Eine einfache Methode besteht darin die Nachricht aufzuschreiben und danach einen Boten den Auftrag zu erteilen, dieses Schriftstück zum Adressaten zu bringen. Der Bote kann zu Fuß gehen oder reiten, in beiden Fällen ist die Übertragungsgeschwindigkeit nicht sehr groß. Eine andere

Methode der Nachrichtenübermittlung war bereits in der Antike bekannt. Die Römer benutzten Feuersignale, die durch einzelne – untereinander in Sichtverbindung stehende – Stationen übermittelt wurden. Es war auf diese Weise möglich, innerhalb von zwei Stunden eine Nachricht von England nach Rom zu übermitteln. Eine weitere Methode der Nachrichtenübertragung ist das in Afrika entwickelte System der Buschtrommel.

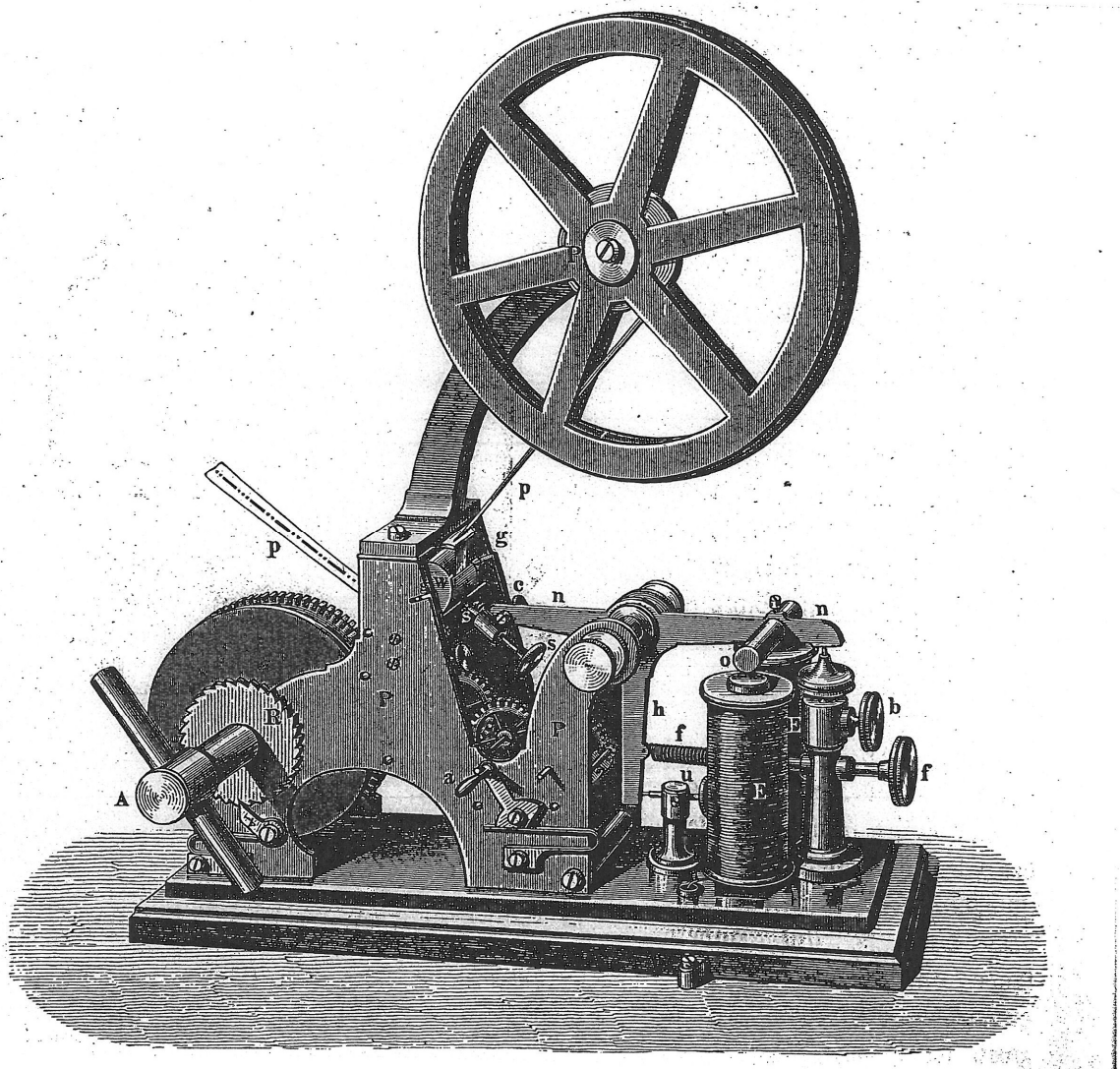


Abb. 1.3.2: Morse'scher Schreibtelegraph (nach LaCour/Appel).

Im Laufe der Zeit wurden noch andere Verfahren erdacht, die aber alle durch die auf elektrischer Grundlage arbeitenden Geräte übertroffen werden. Eine Möglichkeit zur Übermittlung von Signalen auf diesem Wege bietet der elektrische Stromkreis. Ein einfaches Beispiel mag dies erläutern. Man schließt an eine elektrische Quelle eine Glühlampe an; im Leiterkreis befindet sich außer der Glühlampe noch ein Schalter, der geöffnet und geschlossen werden kann. Ist der Schalter auf „Durchlass“ gestellt, so leuchtet die Glühlampe, ist der Leiterkreis unterbrochen, so leuchtet die Glühlampe nicht. Zu einer detaillierten Signalübertragung muss in diesem Fall eine Codierung gefunden werden, welche einer Signalfolge beispielsweise einzelne Buchstaben zuordnet. Damit ist auf digitaler Basis die Übertragung von Worten möglich sofern auf Empfängerseite eine entsprechende Entschlüsselung stattfindet. Das System besitzt den Vorteil, dass verhältnismäßig große Entfernungen überbrückt werden können und dass sich die Signale sehr schnell ausbreiten. Das dargestellte System beschreibt das Prinzip des „Telegraphen“. Erste Apparate dieser Art wurden bereits kurz nach der Verfügbarkeit der Volta'schen Säule entwickelt, sie waren aber in ihrer Funktionsweise etwas schwerfällig. Eine spürbare Verbesserung brachte die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Oersted (1820). Auf Empfängerseite konnte ein Elektromagnet eingesetzt werden, der mit einer Nadel die ankommenden Signale auf einen Papierstreifen übertrug („elektromagnetischer Nadeltelegraph“). Den Durchbruch erreichte das System nach der Erfindung des Morsealphabetes (einer Kodierung von Buchstaben durch Kombination kurzer und langer Signale) durch Samuel MORSE (1791 – 1872) im Jahre 1838. Morse verbesserte seine Apparatur durch die Einführung einer handbetätigten Taste, mit welcher der Stromfluss durch die Leitungen im Takt der Signale gesteuert werden konnte. Auf der Seite des Empfängers wurden die ankommenden Signale mit Hilfe eines durch einen Elektromagneten angewählten Schreibstiftes auf eine Papierrolle aufgezeichnet. Damit war ein Gerät verfügbar, mit dessen Hilfe

Nachrichten über große Entfernungen sehr schnell übertragen und aufgezeichnet werden konnten – man schrieb nicht Briefe, sondern „Telegramme“.

Beim Telegrafen erfolgt die Signalübertragung auf digitaler Basis, bei einem anderen Gerät, das weiteste Verbreitung fand, geschieht dies analog – gemeint ist der Fernsprecher. Auch hier bildet ein geschlossener elektrischer Leiterkreis die Grundlage für die Funktionsweise dieses Apparates. Auf der Seite des Senders wird das gesprochene Wort moduliert durch die Leitung zum angewählten Empfänger übertragen und dort im Fernhörer in akustische Signale umgewandelt. Der Erfinder dieses Prinzips ist Philipp REIS (1834 – 1874), der 1861 auf diese Weise erstmals die menschliche Stimme übertragen konnte. Später wurde diese Erfindung von Alexander Graham BELL (1847 – 1922) zum technisch funktionsfähigen Gerät entwickelt.

Telegraf und Fernsprecher benötigen zur Signalübertragung die Existenz von elektrisch leitenden Kabelverbindungen, und so war es einige Jahrzehnte später eine umwälzende Erfindung, als es Guglielmo MARCONI (1874 -1937) erstmals gelang eine drahtlose telegrafische Verbindung herzustellen (1899 über den Ärmelkanal; 1901 über den Nordatlantik). Physikalische Grundlage dieses epochalen Schrittes sind die 1862 von J.C. Maxwell postulierten und 1887 von Heinrich Hertz experimentell bestätigten elektromagnetischen Wellen, welche sich im Vakuum und in Luft jeweils mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Auf dieser Grundlage entwickelte sich die Rundfunktechnik, gestützt auf ihr wichtigstes Bauteil, nämlich die Elektronenröhre. Als Verstärkerelement fungiert die Triode. Mit dieser Technik war es - nach Entwicklung geeigneter Sender und Empfänger - möglich, Nachrichten zu senden und in der ganzen Welt zu empfangen (ab 1920). Einige Jahrzehnte später wurde dieses System der Tonübertragung dadurch erweitert, dass zusätzlich zur Sprache auch Bilder übertragen werden konnten - die Geburtsstunde des Fernsehens war eingeläutet. Die Technik der Bildübertragung stützt sich auf die

Fernsehbildröhre, eine von Karl Ferdinand BRAUN (1850 - 1918) entwickelte Elektronenstrahlröhre („Braun'sche Röhre“, 1897). Eine tiefgreifende Umgestaltung erfuhr die Welt des Rundfunks durch die aufkommende Halbleitertechnik. Diese neue Technik ersetzt das wesentliche Bauteil der Röhrentechnik, die Triode, durch den Transistor (1948). Damit ist eine neue Epoche auf dem Gebiet der Informationsübertragung eröffnet, die in der Weiterentwicklung des flachen Bildschirms an Stelle der Elektronenstrahlröhre eine deutlich sichtbare Gestalt angenommen hat.

II. Grundlegende Phänomene und ihre begriffliche Erfassung

Im folgenden Kapitel sollen grundlegende Phänomene aus der Elektrik beschrieben werden mit dem Ziel, diese Erscheinungen durch geeignete Vorstellungen und Begriffe zunächst qualitativ und anschließend quantitativ zu erfassen. Zur Verdeutlichung des angestrebten methodischen Weges mögen die nachfolgenden didaktischen Hinweise dienen.

Didaktische Vorbemerkung

Es ist eine Aufgabe des Physikunterrichtes, die Schüler in das naturwissenschaftliche Denken einzuführen. Ein wichtiger Bereich davon ist die Begriffsbildung in der Physik. Die Heranbildung präziser Begriffe ist ein schwieriger Prozess, der im Laufe der geschichtlichen Entwicklung der Naturwissenschaften mitunter sehr lange dauerte. Einen möglichen Ausgangspunkt zur Bildung physikalischer Begriffe bieten Alltagssprache und Alltagsvorstellungen. In den einzelnen Teilgebieten der Physik kann dieser Weg mit sehr unterschiedlichen Problemen verbunden sein. So ist in der Mechanik der Zugang zu den Begriffen Länge und Volumen über die Erfahrung möglich, man kann die damit in Zusammenhang stehenden Maßnahmen (z.B. die Messung einer Länge mit dem Maßstab oder die Bestimmung des Volumens einer Flüssigkeit mit einem Hohlgefäß) im wahrsten Sinne des Wortes „begreifen“. Bei anderen Phänomenen (wie z.B. der Temperatur oder Lichterscheinungen) steht dem Menschen mit dem Temperatursinn in der Haut und dem Auge ein Sinnesorgan zur Verfügung, welches einen Zugang zu den betrachteten Phänomenen erleichtert. In der Elektrizitätslehre ist dies anders, der Mensch besitzt für elektrische und magnetische Erscheinungen kein Sinnesorgan, die diesbezügliche Wahrnehmung ist auf die Registrierung von Sekundäreffekten angewiesen. Damit ist der Zugang zu elektrischen und magnetischen Phänomenen auf direkte Weise nicht möglich, man

ist von Beginn an auf die Entwicklung abstrakter Vorstellungen und Begriffe angewiesen. Die historische Entwicklung der Elektrizität zeigt dies deutlich – die damaligen Forscher führten die Bezeichnung „elektrisches Fluidum“ oder „Elektrizität“ ein, ohne dass damit gesagt wurde, was mit diesen Vokabeln überhaupt gemeint war. Man wird hier an den Ausspruch in Goethes Faust erinnert: „... denn eben wo Begriffe fehlen da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein“.

Betrachtet man die geschichtliche Entwicklung der Elektrizität, so kann man – ganz im Sinne Martin Wagenscheins – feststellen, dass der Zugang über Natur- und Laborphänomene erfolgte. Als Naturphänomen kann der Blitz genannt werden, Laboruntersuchungen wurden u.a. durch Otto von Guericke um 1650 durch Reiben einer Schwefelkugel durchgeführt. Beobachtet wurden die Überschläge von Funken sowie das Auftreten von neuen, bis dahin nicht erklärbaren Kräften. Zugeschrieben wurde dies dem Auftreten von „Elektrizität“, wobei die Frage nahe lag, „wie viel Elektrizität“ im Einzelfall vorlag. Es mussten also Messverfahren zur quantitativen Erfassung von „Elektrizitätsmengen“ ersonnen werden. Die Entwicklung führte schließlich zur Bildung des Begriffes der „elektrischen Ladung“ – jenes Begriffes, der historisch gesehen als Grundgröße der Elektrizitätslehre anzusehen ist. Die Tatsache, dass in der heutigen Zeit als Basisgröße der Elektrizität die Stromstärke I (gemessen in Ampère) festgelegt wurde, hat ihre Ursache darin, dass diese Größe sehr viel genauer gemessen werden kann als die elektrische Ladung Q . Hervorgehoben werden muss jedoch, dass der historische Zugang zur Elektrizitätslehre über die Elektrostatik erfolgte.

Beschränkt man sich bei der Behandlung der Elektrizitätslehre auf gängige Phänomene, so können diese in hinreichendem Maße mit Hilfe des Begriffes der elektrischen Ladung beschrieben werden. Allerdings gibt es Erscheinungen, die in der historischen Entwicklung eine große Rolle spielten und die mit dem Begriff der elektrischen Ladung allein nicht gedeutet werden können. Die betreffenden experimentellen Ergebnisse machten es nötig, noch

eine weitere Größe einzuführen. Diese neue Größe ist verknüpft mit der im fraglichen Prozess auftretenden elektrischen Ladung und der dabei erforderlichen Energie. Eine genaue Analyse führt - auf der Grundlage der Elektrostatik - zum Begriff der elektrischen Spannung. Damit ist die Begriffsbildung zur vollständigen Erfassung der experimentellen Erfahrung auf dem Gebiet der Elektrostatik abgeschlossen, weitere Begriffe sind auf diesem Teilgebiet der Physik nicht erforderlich.

Geht man von der Elektrostatik zum Gebiet der Stromkreis-Elektrik über, so ergibt sich - bezüglich der erforderlichen Begriffe - ein anders Bild. Historisch gesehen war dies der Fall, nachdem Alessandro VOLTA um 1800 eine elektrische Quelle (die „Volta'sche Säule“) entwickelt hatte, welche die Tür zu einem völlig neuen Teilgebiet der Elektrik öffnete. Bis dahin war lediglich bekannt, dass „Elektrizität“ auf bestimmten Trägern ruhte und dass Elektrizität mit einem „Konduktor“ (einer auf einem Isolierstiel befestigten Metallkugel) von einem Träger zu einem anderen transportiert werden konnte. Jetzt trat ein gänzlich neues Phänomen auf: Mit Hilfe der Volta'schen Säule konnte ein kontinuierliches Strömen der Elektrizität erreicht werden. Das nächste Problem bestand darin, dieses „Strömen“ der Elektrizität begrifflich zu erfassen. Ein Vergleich mit dem „Strömen“ von Wasser in einem Fluss bietet sich an. Stellt man sich die Frage, „wie viel Wasser“ eines Flusses an einem am Ufer stehenden Beobachter vorbei fließt, so ist die Antwort für den Rhein bei Basel (mittlere Wasserführung vorausgesetzt): Es fließen 1000 m^3 Wasser in einer Sekunde am Beobachter vorbei. Entsprechend kann man für den elektrischen Fall eine Modellvorstellung aufbauen, nach welcher an einem festen Ort des metallischen Leiters eine zu messende „Menge von Elektrizität“ (also des schon erwähnten „elektrischen Fluidums“) in einer bestimmten Zeit (beispielsweise in einer Sekunde) vorbei fließt. Die Weiterentwicklung dieser Vorstellung führt zum Begriff der „elektrischen Stromstärke“ und zu der Notwendigkeit, diese Größe durch geeignete Festlegungen messtechnisch in quantitativer Weise zu erfassen. Dies ist über

Sekundäreffekte, welche durch die strömende Elektrizität hervorgerufen werden, grundsätzlich möglich. Für dieses Ziel geeignete Effekte sind die magnetische und die chemische Wirkung sowie die Wärmewirkung des elektrischen Stromes.

Bleibt man bei dem Bild der strömenden Elektrizität und der Analogie mit dem strömenden Wasser in einem Fluss, so liegt ein weiterer Begriff nahe. Das Strömen des Wassers im Fluss kann in vielfältiger Weise gehemmt werden (z.B. durch die besondere Gestalt des Flussbettes). Als Folge derartiger Hindernisse wird die Durchflussmenge des Wassers pro Zeiteinheit herabgesetzt. Deuten kann man dies durch die Vorstellung, dass dem Strömen des Wassers ein Widerstand entgegen wirkt. Diese Betrachtungsweise beim strömenden Wasser kann man auf das Strömen der Elektrizität in einem Leiter übertragen; auf diese Weise gelangt man - zunächst rein qualitativ - zum Begriff des elektrischen Widerstandes. Daran schließt sich die Frage nach einer quantitativen Erfassung und nach einer konkreten Messmöglichkeit dieser Größe an.

Die angesprochene Analogie zwischen strömendem Wasser und strömender Elektrizität gestattet die Hinführung zu einem weiteren physikalischen Begriff. Die Alltagserfahrung gibt uns dazu Hinweise. Betrachtet man das strömende Wasser in einem großen Fluss, der sich in einer Tiefebene dem Meer nähert, so fließt das Wasser sehr träge dahin. Anders ist die Situation bei einem Gebirgsbach, der mit starkem Gefälle einen Steilhang hinabstürzt. Auch beim Gießen des Rasens mit einem Gartenschlauch kann man einiges beobachten; falls der Wasserstrahl einen weit entfernten Punkt nicht erreicht, kann man den Wasserhahn „stärker aufdrehen“, dann ergibt sich eine größere Reichweite. An diesen Beispielen zeigt sich, dass beim Strömen des Wassers (im Fluss oder im Gartenschlauch) noch eine weitere, bis dahin nicht erwähnte Größe eine Rolle spielt: Das strömende Wasser kann unterschiedlich stark „angetrieben“ werden. In der Mechanik ist diese physikalische Größe, die den „Antrieb“ des strömenden Wassers beschreibt, der Wasserdruck.

Im Fall der strömenden Elektrizität ist es nicht leicht, eine entsprechende analoge Größe zu finden. Im Bereich der Stromkreis-Elektrik führen diesbezügliche Überlegungen zum Begriff der elektrischen Spannung als einer Größe, die zwei wichtige Funktionen im Leiterkreis beschreibt: Einerseits soll das Strömen der Ladungsträger in Gang gesetzt und aufrecht erhalten werden, und andererseits soll Energie von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät transportiert werden. Auch hier muss eine klare Begriffsdefinition und ein Messverfahren erarbeitet werden, was in Anbetracht der abstrakten Vorstellungen auf diesem Gebiet äußerst schwierig ist.

Ergänzende Anmerkung

An dieser Stelle soll auf eine Lernschwierigkeit bei der Behandlung des Begriffes der elektrischen Ladung aufmerksam gemacht werden. Die Vokabel „elektrische Ladung“ bedeutet für die Schüler eine ernste Hürde im Verständnis. Benutzt man im alltäglichen Sprachgebrauch das Wort „Ladung“, so stellt man sich einen Wagen (einen Leiterwagen oder einen LKW) vor, der zunächst leer ist und auf den dann eine „Ladung“ - bestehend aus irgendwelchen Gegenständen - aufgebracht wird. Überträgt man diese Vorstellung auf elektrische Phänomene, so bedeutet dies folgendes: Einen elektrisch neutralen Körper kann man sich (nach diesem Bild) im Hinblick auf „Elektrizität“ leer vorstellen, und wenn dieser Körper „elektrisch geladen“ wird, dann bringt man „Elektrizität“ in Form einer - wie auch immer gestalteten - Portion Materie zusätzlich auf diesen Körper auf. Die historisch geprägte Vorstellung von einem elektrischen „Fluidum“ (also einer elektrischen „Flüssigkeit“) weist in diese Richtung.

Die heutigen Vorstellungen liefern ein anderes Bild. Die Atomphysik sagt aus, dass die Welt aus kleinsten Teilchen aufgebaut ist. Das atomistische Prinzip geht jedoch noch weiter, es fordert die Übertragung dieser Vorstellung auf die elektrische Struktur der Materie. Dies bedeutet: Elektronen und Protonen, die Grundbausteine der Materie, können nicht losgelöst von ihren elektrischen Eigenschaften betrachtet werden - diese sind im

Gegenteil untrennbar mit diesen Teilchen verbunden. Vereinfacht ausgedrückt heißt dies: Ein Elektron ohne Elementarladung gibt es nicht. Auf der Basis dieser Betrachtungsweise muss die Vorstellung einer „elektrischen Ladung“ als etwas Materielles, das zusätzlich hinzu kommt, wenn ein elektrisch neutraler Körper „elektrisch geladen“ wird, aufgegeben werden. Demnach kann man sich die elektrische Ladung als eine abstrakte Eigenschaft von bestimmten Teilchen vorstellen (z.B. von Elektronen und Protonen), die diesen Teilchen untrennbar anhaftet. Mit geeigneten Messmethoden kann man diese Eigenschaft quantitativ erfassen.

Ein Zusammenhang zwischen einer „elektrischen Ladung“ und einer bestimmten „Menge an Materie“ ist allerdings insoweit gegeben, als wir folgendes sagen können: Ist ein Körper elektrisch negativ geladen, so befinden sich auf diesem Körper mehr Elektronen als im elektrisch neutralen Zustand. Die Masse dieser zusätzlichen Anzahl von Elektronen im elektrisch negativ geladenen Körper ist jedoch im Vergleich zur Masse des gesamten elektrisch neutralen Körper so verschwindend klein, dass dieser Unterschied mit heutigen Verfahren nicht feststellbar ist und daher außer Betracht bleiben kann.

Auf einen weiteren Aspekt des angesprochenen Problems sei noch hingewiesen. Wie mehrfach betont wurde ist die Eigenschaft „elektrische Ladung“ untrennbar mit Materie verbunden. Dies bedeutet, dass zwischen der elektrischen Ladung eines Körpers und seiner Masse ein Zusammenhang besteht. Dieser Tatbestand liegt insbesondere bei Ionen in Elektrolyten vor. Dabei handelt es sich um folgende Situation: Bei einem Elektrolyten ist die Masse eines einzelnen Ladungsträgers (also eines Ions) im Vergleich zur Masse eines Ladungsträgers in einem metallischen Leiter (also eines Elektrons) sehr groß. Weiter erfolgt beim Strömen der Ionen durch den Elektrolyten eine Stoffabscheidung an den Elektroden; die Masse dieser abgeschiedenen Stoffe ist so groß, dass sie mit einer Wägung bestimmt werden kann. Geht man davon aus, dass die elektrische Ladung der beteiligten Ionen aus chemischen Untersuchungen bekannt ist, so kann man aus der Masse der

abgeschiedenen Stoffe die dabei transportierte elektrische Ladung ermitteln. Das beschriebene Phänomen der Stoffabscheidung beim Ladungsdurchgang durch Elektrolyten kann man also einerseits zur Messung elektrischer Ladungen verwenden, andererseits bietet es auch die Möglichkeit, eine Einheit für die elektrische Ladung festzulegen, wenn man sich auf einen bestimmten Elektrolyten und auf eine bestimmte Masse der abgeschiedenen Stoffe bezieht.

1. Elektrizität – Ein faszinierendes Phänomen

Wenn wir das Wort „Elektrizität“ hören, so fällt es nicht leicht, damit präzise Vorstellungen zu verbinden. Einen möglichen Zugang bieten Naturphänomene, und eines der bekanntesten unter ihnen ist der Blitz. Diese eindrucksvolle Naturerscheinung können wir bei einem Gewitter beobachten – wir sehen ein grelles Licht am Himmel und wir hören das Rollen des Donners, aber das Wesen des Blitzes bleibt zunächst im Verborgenen. Die Folgen, die ein Blitzschlag in der Natur und an Gebäuden anrichten kann, können verheerend sein. Durch derartige Ereignisse wird jedoch kaum etwas über den Blitz selbst offenbar – man erblickt darin ein unbekanntes und unverständliches Etwas. Daher ist es nicht verwunderlich, wenn die Menschen früherer Epochen den Blitz und andere Naturereignisse fürchteten und diese Vorkommnisse mit dem Walten von Göttern in Verbindung brachten.

Für uns Menschen von heute ist die Vokabel „Elektrizität“ insofern vertraut, als wir in unserem Alltag ständig Geräte benutzen, welche „elektrisch“ betrieben werden – sei es durch die Steckdose, eine Batterie oder einen Akku. In diesem Werk sollen solche Geräte ganz allgemein als

Elektrogeräte

bezeichnet werden. Die Formulierung „Verbraucher“ wird bewusst vermieden, da durch dieses Wort suggeriert wird, dass in dem Gerät etwas „verbraucht“ wird. Nach den auf dem Energiesatz gründenden Vorstellungen wird in einem Elektrogerät die eingespeiste Energie jedoch nicht verbraucht, sondern

lediglich von einer Form in eine andere umgewandelt. Die Vielzahl und Mannigfaltigkeit dieser Geräte ist bekannt, sie finden sich in Haus und Umgebung, als Beispiele seien genannt: Die Glühbirne, der Elektroherd, Elektromotoren unterschiedlichster Größe (vom Rührgerät in der Küche bis zum ICE), Fernsehgeräte, Computer und satellitengestützte Navigationsgeräte. Das Erscheinungsbild der „Elektrizität“ ist in diesen Geräten vielfältig, eine gemeinsame Wurzel ist – außer dem Anschluss an eine Steckdose – zunächst nur schwer zu erkennen. Die Aufgabe des Unterrichtes ist es daher, nach dieser gemeinsamen Wurzel zu suchen.

Bei dieser Suche nach dem Wesen der Elektrizität hilft uns eine einfache Erfahrung, die wir im Alltag machen können: Durch kurzzeitigen Kontakt unseres Körpers mit einem Gegenstand unserer Umgebung kann unser Körper „elektrisch“ oder „elektrisiert“ werden, ohne dass wir dies zunächst bemerken. Berühren wir danach andere Körper oder geben wir einem Menschen die Hand, so kann es passieren, dass ein „elektrischer Funke“ überspringt und wir erschrecken ohne dabei Schaden zu nehmen. Das Erlebnis ist eindrucksvoll, weil wir etwas registrieren, und dennoch ist es ein wenig unheimlich, weil wir zwar den Funken „spüren“, aber dennoch mit unseren Sinnen nicht zu erfassen vermögen was sich dahinter verbirgt. Das Erlebnis zeigt eine grundsätzliche Schwierigkeit für den Unterricht in Elektrizitätslehre auf: Der Mensch besitzt für elektrische und magnetische Erscheinungen kein Sinnesorgan, unsere Wahrnehmung ist auf Sekundäreffekte der elektrischen (und magnetischen) Vorgänge angewiesen. Dies führt zwangsläufig dazu, dass alle Betrachtungen, die elektrische Vorgänge betreffen, sich notgedrungen ziemlich abstrakt gestalten. Diesen schwierigen Zugang sucht man durch anschauliche Modellvorstellungen zu erleichtern, doch muss man klar sehen, dass der abstrakte Charakter der Elektrizität dadurch nicht beseitigt werden kann.

Das oben beschriebene Phänomen des Überspringens eines Funkens von einem Menschen auf einen anderen ist von

grundlegender Bedeutung, es kann als Einstiegsversuch in die Elektrik gewählt werden. Geht man diesen Weg, so kann man weiter auf die historische Entwicklung der Elektrizitätslehre zurück greifen und dabei sehr schön zeigen, dass ein möglicher didaktischer Zugang zu diesem Teilgebiet der Physik über die Elektrostatik führt. In diesem Werk soll dieser Zugang beschritten werden, erst danach wird die Stromkreiselektrik behandelt.

Abschließend sei noch ein Aspekt erwähnt, der nach der Behandlung der Elektrostatik eine wichtige Rolle in der Stromkreiselektrik spielt. In einem geschlossenen Leiterkreis haben wir eine elektrische Quelle und ein angeschlossenes Elektrogerät, beide sind durch Kabel miteinander verbunden. Die elektrische Quelle bewirkt zwei Dinge: Einmal bewegt sie die Ladungsträger von der Quelle durch die Leitungen und wieder zurück zur Quelle, zum anderen sorgt sie dafür, dass von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät Energie transportiert wird. Die Verfügbarkeit von elektrischer Energie ist ein zentraler Punkt bei der Benutzung sämtlicher Elektrogeräte. Die Bereitstellung – nicht die Erzeugung - von elektrischer Energie kann durch größere oder kleinere „E–Werke“ erfolgen, die mit fossilen Brennstoffen, mit Kernbrennstoffen oder mit regenerativen Energieträgern arbeiten. Wird als Brennstoff Steinkohle (oder Braunkohle) verwendet, so spricht man in der Elektrizitätswirtschaft von einem „Kohlekraftwerk“. Hier ist anzumerken, dass die Vokabel „Kraft“ vor über hundert Jahren jene Bedeutung hatte, die wir heute mit dem Wort „Energie“ belegen. Da man gemäß Energiesatz die physikalische Größe „Energie“ weder aus dem Nichts heraus erzeugen noch sie vernichten kann, sondern lediglich eine Umwandlung von einer Energieform in eine andere möglich ist, so ist – im erwähnten Sinne – eine „Energieerzeugung“ durch ein E-Werk gar nicht möglich. Folglich müsste man ein „Kohlekraftwerk“ im physikalisch strengen Sinn als „Thermo-elektrisches Energie-Umwandlungs-Werk“ bezeichnen. Ein „Wasserkraftwerk“ wäre entsprechend ein „Hydro-elektrisches Energie-Umwandlungs-

Werk“. Die eben angestellte Betrachtungsweise mag vielleicht überspitzt erscheinen, man sollte jedoch den großen Einfluss der Sprache auf den Lernprozess beim Schüler nicht unterschätzen. Darüber hinaus besteht ja die Möglichkeit, gängige Sprachgepflogenheiten im Unterricht zu benutzen und diese – parallel dazu – kritisch zu beleuchten.

In Zusammenhang mit den erwähnten „Energie-Umwandlungs-Werken“ ist an dieser Stelle ein besonderes Phänomen der Elektrik hervorzuheben, nämlich der Transport von elektrischer Energie mit Hilfe von metallischen Leitern (also durch Drähte). Zur Verdeutlichung sei auf folgendes hingewiesen: Der Transport der Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Erdöl oder Erdgas erfordert die Bewegung großer Mengen von Materie – man denke nur an die gewaltigen Rohrleitungen, in denen Erdöl oder Erdgas von den Förderstellen zum Abnehmer (nicht zum „Verbraucher“ im Sinne des Begriffes „Energie“) transportiert wird. Im Vergleich dazu benötigt man zur Übertragung von elektrischer Energie ähnlicher Größe nur „Drähte“ (Überlandleitungen), bei denen sich – makroskopisch betrachtet - keine Materie bewegt. Hier wird eine phantastische Eigenschaft der elektrischen Energie erkennbar, die im höchsten Grade zu bewundern ist.

1.1 Von der „Elektrizitätsmenge“ zur „elektrischen Ladung“

Der Zugang zur Elektrizitätslehre soll hier über einfache Versuche erschlossen werden, die überraschende Ergebnisse zeigen. Die Aufgabe des Physikunterrichtes ist es dann, diese Ergebnisse möglichst genau zu beschreiben und dann nach einer Deutung zu suchen. Die erwähnten Versuche beruhen darauf, dass zwei Körper in engen Kontakt gebracht und dann getrennt werden. Um die Kontaktfläche zwischen den Körpern zu vergrößern werden sie zweckmäßigerweise aneinander gerieben. Dabei ist zu betonen, dass für den zu beobachtenden Effekt der Kontakt der entscheidende Vorgang ist, das Reiben verstärkt diese Wirkung lediglich durch die Vergrößerung der Kontaktfläche. Die in der

Literatur gebräuchliche Bezeichnung für die genannte Erscheinung ist Kontaktelektrizität.

Phänomen 1: Ein Kunststoffstab wird an einem Fell gerieben. Trennt man danach beide Körper und streicht dann mit dem Stab über das Fell ohne es zu berühren, so richten sich die Haare auf, sie werden von dem Stab angezogen.

Deutung: Durch den Kontakt werden die beiden Körper verändert, es treten - als Folge dieser Veränderung - Kräfte auf, welche zuvor nicht existierten.

Phänomen 2: Eine Schallplatte wird mit einer Plastikfolie gerieben und dann von ihr getrennt; zwischen beiden Körpern bestehen dann anziehende Kräfte. Wird der Versuch mit einem weiteren Paar dieser Körper wiederholt und werden dann die beiden (an den Schallplatten geriebenen) Folien einander genähert, so stellt man zwischen den Folien Abstoßung fest.

Die beiden Versuche zeigen, dass durch den Kontakt zweier Körper diese offensichtlich in der Art verändert werden, dass danach anziehende und abstoßende Kräfte auftreten können, je nachdem welche Körper miteinander kombiniert werden. Eine Deutung ist möglich, wenn man annimmt, dass die beiden Körper nicht in gleicher, sondern in unterschiedlicher Weise verändert werden. Liegen keine weiteren Erfahrungen vor, so ist das Aufstellen einer Hypothese nicht leicht. Ist dagegen bekannt, dass bei Permanentmagneten unterschiedliche Pole bestehen und dass sich gleichnamige Pole abstoßen und ungleichnamige anziehen, so ist die Aufstellung einer begründeten Vermutung durch Analogieschluss naheliegend.

Deutung: Es entstehen durch die obigen Versuche zwei Arten von veränderten Zuständen, man sagt zwei Arten von elektrischen Zuständen bzw. zwei Arten von „Elektrizität“. Körper gleichen Zustandes (gleicher

Elektrizität) stoßen sich ab, Körper ungleichen Zustandes (ungleicher Elektrizität) ziehen sich an.

Die Frage der Kennzeichnung der beiden elektrischen Zustände bzw. der beiden Arten von „Elektrizität“ ist eine Definitionsangelegenheit, welche in unterschiedlicher Weise beantwortet werden kann. Man ist übereingekommen, die beiden Arten der Elektrizität als positiv und als negativ zu bezeichnen. Gemäß dieser Festlegung ist der am Fell geriebene Kunststoffstab elektrisch negativ, die an der Plastikfolie geriebene Schallplatte ebenfalls negativ, die Folie entsprechend elektrisch positiv.

Bis jetzt wurde – im Zuge der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung – die Vorstellung vom „elektrischen Zustand“ eines Körpers oder von einem „elektrisch geladenen“ Körper entwickelt. Als nächstes stellt sich die Aufgabe, für die Existenz eines solchen Zustandes ein Nachweisgerät zu entwickeln, welches auf qualitativer Basis arbeitet. Die Grundlage für den Bau eines solchen Gerätes beruht auf einer Entdeckung, die von Stephen GRAY im Jahre 1729 formuliert wurde. Es handelt sich um das

Phänomen 3: Es gibt Materialien, welche den elektrischen Zustand eines Körpers weiter leiten, und es gibt Stoffe, welche die Weiterleitung des elektrischen Zustandes verhindern. Die erstgenannten bezeichnet man als „elektrische Leiter“, die zweitgenannten als „elektrische Nicht-Leiter“ oder „Isolatoren“.

Zu den elektrischen Leitern gehören alle Metalle, Kohle und bestimmte Flüssigkeiten (z.B. Säuren, Basen und Salzlösungen); Isolatoren sind Holz, Kunststoffe, Keramik, Gummi, Gase und das Vakuum. Man hat also im elektrischen Fall eine ähnliche Situation wie in der Wärmelehre; auch dort gibt es gute und schlechte Leiter für den Transport der betreffenden charakteristischen physikalischen Größe.

Die Entdeckung von Stephen Gray ist eine Voraussetzung für den Bau eines Nachweisgerätes des elektrischen Zustandes. Es stellt sich an dieser Stelle allerdings die Frage, wie man zu der experimentell gestützten Erfahrung, dass es Leiter und Nicht-Leiter gibt, kommen kann, wenn ein Nachweisgerät für den elektrischen Zustand noch gar nicht zur Verfügung steht. Als Antwort auf diese Frage soll ein Weg aufgezeigt werden, wie man mit schulischen Mitteln eine Antwort findet. Dazu nimmt man einen Kunststoffstab, der an einem Fell gerieben wurde, und der nach vorliegender Erfahrung negativ geladen ist. Streicht man jetzt mit dem geladenen Kunststoffstab an der Oberfläche einer Metallkugel entlang und trennt die beiden Körper danach, so kann man folgendes feststellen: Die Metallkugel ist (nach dem beschriebenen Kontakt mit dem Kunststoffstab) ihrerseits elektrisch geladen, denn es treten anziehende Kräfte auf, wenn man die Kugel in die Nähe des Fells bringt. Voraussetzung für das Gelingen des Versuches ist es, dass sich die Metallkugel auf einem Stiel aus Isoliermaterial befindet. Das wichtige Ergebnis des Versuches besteht darin, dass man nicht nur – wie bisher – Isolatoren „elektrisch aufladen“ kann, sondern dass es auch möglich ist, einen Körper aus Metall „elektrisch zu laden“. Dieses Ergebnis kann man dazu verwenden, weitere Versuche durchzuführen. Man verbindet eine elektrisch geladene Metallkugel (die sich auf einem Isolierstiel befindet) mit einer elektrisch neutralen Kugel (ebenfalls auf einem Isolierstiel) kurzzeitig mit einem Metalldraht und entfernt diesen Draht dann. Als Ergebnis stellt man folgendes fest:

- Die zuvor elektrisch neutrale Kugel wurde durch die kurzzeitige metallische Verbindung ebenfalls elektrisch geladen.
- Die zuvor elektrisch geladene Kugel hat ihre elektrische Ladung (mindestens teilweise) behalten.

Durch diese Versuche kann man also die Entdeckung von Stephen Gray bestätigen.

Es soll noch angemerkt werden, dass man den soeben beschriebenen Versuch zur Weiterleitung eines elektrischen Zustandes durch einen Metalldraht modifizieren kann, wenn man den Metalldraht durch einen „Konduktor“ ersetzt; darunter versteht man eine an einem Isolierstiel befestigte Metallkugel. Berührt man mit einem solchen Konduktor einen elektrisch geladenen Körper (z.B. eine geladene Metallkugel), so geht ein Teil der elektrischen Ladung auf den Konduktor über, und dieser kann seinerseits einen Teil seiner elektrischen Ladung an einen elektrisch neutralen Körper weiter geben, wenn er diesen berührt. Danach kann dieser Vorgang wiederholt werden. Mit einem Konduktor kann man also die elektrische Ladung eines Körpers „in Portionen“ an andere Körper weiter geben.

Liegen die beschriebenen qualitativen Kenntnisse über Leiter und Nicht-Leiter sowie über Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern vor, so kann man Aufbau und Wirkungsweise eines Nachweisgerätes für elektrische Ladungen verstehen. Ein solches Gerät, das lediglich anzeigt, ob ein Körper elektrisch geladen ist oder nicht, nennt man Elektroskop (im Unterschied zu einem Elektrometer, das die Größe der elektrischen Ladung quantitativ erfasst). Nach vorausgegangenen Untersuchungen anderer Wissenschaftler konstruierte Abraham BENNET im Jahre 1787 ein Elektroskop, das nach seinem Konstruktionsprinzip als „Goldblatt-Elektroskop“ in die Literatur einging. Das Instrument besteht im Wesentlichen aus einem Metallstab, an dem zwei leichte Metallfäden aus Gold befestigt sind. Der Metallstab wird von einem Gehäuse gehalten, das gegenüber dem Stab elektrisch isoliert sein muss. Berührt man den Stab mit einem elektrisch geladenen Körper, so werden die beiden Goldfäden in gleicher Weise elektrisch geladen (weil der Stab und die Fäden gute elektrische Leiter sind); folglich wirken zwischen den Fäden abstoßende elektrische Kräfte und die Fäden spreizen sich auseinander – ein Anzeichen für das Vorhandensein einer elektrischen Ladung.

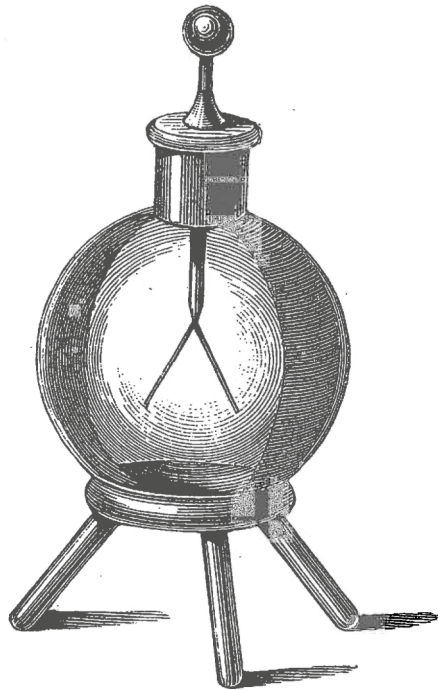


Abb. 2.1.1: Bennet'sches Goldblatt-Elektroskop von 1787 zum Nachweis von elektrischen Ladungen (nach LaCour/Appel).

Bisher wurden elektrische Phänomene lediglich beschrieben, es stellt sich nun aber folgende Problemfrage: Wie kann man sich die Entstehung der beiden elektrischen Zustände erklären? Dazu seien zwei Hypothesen vorgestellt.

Hypothese 1: Durch die Berührung der beiden Körper (z.B. Kunststoffstab und Fell) entsteht etwas Neues, das vorher nicht existierte.

Hypothese 2: Durch die Berührung der beiden Körper wird etwas bereits Vorhandenes umverteilt.

Als Entscheidungshilfe zwischen den beiden Hypothesen kann der folgende Versuch dienen. Ein an einem Stab befestigtes kleines Fell wird an dem Kunststoffstab gerieben, jeder der beiden Körper wird für sich je einem Elektroskop genähert, der Ausschlag der

Geräte zeigt den elektrischen Zustand beider Körper an. Anschließend werden die beiden elektrischen Körper gemeinsam in den Faraday'schen Becher eines dritten Elektroskopes gesteckt, es erfolgt kein Ausschlag des Instrumentes (Die Wirkungsweise des Faraday'schen Bechers kann erst später erklärt werden). Als Ergebnis erhalten wir ein weiteres Phänomen.

Phänomen 4: Zwei Körper, welche durch Kontakt jeweils in einen elektrischen Zustand versetzt wurden, ergeben zusammen an einem Elektroskop keinen Ausschlag.

Deutung: Das Experiment stützt die Hypothese 2. Die diesbezügliche Modellvorstellung kann durch die Annahme erweitert werden, dass jeder Körper im Normalzustand elektrisch neutral ist und beide Arten von „Elektrizität“ in ihm in gleicher Menge vorhanden sind. Weiter kann vermutet werden, dass die beiden elektrischen Zustände an Materie gekoppelt existieren, d.h. bei Kontakt der beiden Körper geht - nach dieser Vorstellung - ein Teil der Materie von dem einen Körper auf den anderen über (bei den bisher genannten Erscheinungen allerdings in minimaler Menge). Die Materieverschiebung muss offensichtlich direkt mit den beiden elektrischen Zuständen verknüpft sein.

An dieser Stelle sei noch eine Bemerkung zum Sprachgebrauch angefügt. Bisher wurde bewusst nur von Körpern gesprochen, welche sich „in einem elektrischen Zustand“ befinden. Man kann dies auch so ausdrücken, dass man sagt, die Körper seien „elektrisch geladen“ oder die Körper „besitzen eine elektrische Ladung“. Die Formulierung „elektrisch geladen“ schließt sich an diesen Sprachgebrauch an. Das Substantiv „elektrische Ladung“ geht einen Schritt weiter, denn es impliziert - vom Alltagssprachgebrauch her - dass auf dem sich im elektrischen Zustand befindlichen Körper noch etwas Zusätzliches - eben eine Ladung - vorhanden wäre. Die Modellvorstellung der Elektronen beschreibt dies zutreffend, sie sollte jedoch erst dann

herangezogen werden, wenn die Schüler mit den grundlegenden Phänomenen wohl vertraut sind.

Die dargelegten Erscheinungen lassen folgende qualitative Begriffsdefinition der elektrischen Ladung zu:

Die „elektrische Ladung“ ist ein Maß für die Veränderung eines Körpers, wenn dieser mit einem anderen Körper in engen Kontakt gebracht und dann getrennt wurde. Durch diese Veränderung treten neue Eigenschaften der geriebenen Körper auf, z.B. anziehende und abstoßende Kräfte. Atomistisch gesehen können die beiden möglichen elektrischen Zustände („elektrische Ladungen“) durch einen Überschuss oder durch einen Mangel kleinster Teilchen mit entsprechenden „elektrischen“ Eigenschaften gedeutet werden.

Die vorausgegangenen Betrachtungen zeigen zwei Probleme. Das erste ist ein Problem der naturwissenschaftlichen Forschung. Die Physiker, die sich vor etwa 300 Jahren dem Gebiet zuwandten, das wir heute mit „Elektrik“ bezeichnen, standen vor gewaltigen experimentellen und begrifflichen Schwierigkeiten. In diesem Werk soll versucht werden, diese Schwierigkeiten anklingen zu lassen. Das zweite Problem ist ein Problem des Physikunterrichtes. Dieser hat die Aufgabe, durch das hochdimensionale Gebäude der Naturwissenschaften einen eindimensionalen Faden hindurch zu legen. Konkret bedeutet dies, dass die Naturerscheinungen untereinander zusammenhängen und dass ein einziges, isoliertes Phänomen im Grunde nicht existiert. Dies hat zur Folge, dass man beim Erklären einer Erscheinung stets noch mehrere andere Erscheinungen zum gleichen Zeitpunkt erklären müsste - eigentlich eine unlösbare Aufgabe, die nur durch die Forschungsmethode der Physik einigermaßen bewältigt werden kann. Diese Methode besteht u.a. darin, zu idealisieren und von „störenden Effekten“ weitgehend abzusehen. Der so geschaffene „reine Fall“ ist dann (eher) überschaubar.

1.2 Die Messung der elektrischen Ladung

Bei der Suche nach einer Messmöglichkeit für die elektrische Ladung muss man auf die damit verbundenen Eigenschaften elektrisch geladener Körper zurückgreifen, im Falle der Elektrostatik auf die zwischen elektrisch geladenen Körpern wirkenden anziehenden und abstoßenden Kräfte. Es war Charles Augustin de COULOMB (1736 - 1806), welcher in den Jahren 1785/86 das Problem auf dieser Grundlage löste, nach ihm wurde die Einheit der elektrischen Ladung benannt.

Coulomb ging von der Hypothese aus, dass für elektrisch geladene Körper ein ähnlicher mathematischer Zusammenhang gelten müsse wie bei der Gravitation, er vermutete

$$F = \text{const.} (Q_1 \cdot Q_2 / r^2).$$

Dabei sollen Q_1 und Q_2 die elektrischen Ladungen einschließlich des Vorzeichens und r den Abstand der beiden Körper bedeuten. Weiter wird angenommen, dass sich die elektrischen Ladungen auf punktförmigen Gebilden befinden. Coulombs Anliegen war es zunächst, die Abstandsabhängigkeit der wirkenden Kräfte zu überprüfen. Dazu untersuchte er zunächst die Torsion dünner Drähte (Durchmesser etwa 0,035 mm) und stellte nach umfangreichen Messreihen fest, dass bei der Torsion eines an einem Ende fest eingespannten Drahtes am freien Ende eine Kraft (genauer: ein Drehmoment) wirken muss, welches über einen sehr weiten Bereich (d.h. über mehrere volle Umdrehungen hinweg) dem Drehwinkel proportional ist. Dieser dem Hooke'schen Gesetz analoge Zusammenhang bildete die Grundlage für Coulombs weiteres Vorgehen, dem Bau einer Drehwaage zur Messung der elektrostatischen Kräfte. Aus der Abbildung nach Ramsauer ist das Prinzip ersichtlich. Am oberen Ende war der etwa 76 cm lange Metallfaden fest eingespannt, am unteren Ende war ein hantelförmiges Gebilde befestigt, nämlich am einen Ende ein kleines Holunderkügelchen (x) zur Aufnahme der elektrischen Ladung, am anderen Ende zur Herstellung des Gleichgewichtes und zur Dämpfung der Schwingung eine kleine Pappscheibe (W).

Zur Aufbringung der elektrischen Ladung diente eine zweite, gleich große Holunderkugel (y). Zum Schutz gegen Umgebungseinflüsse befand sich die Apparatur in einem Glasgehäuse.

Bei seiner Messung ging Coulomb in folgender Weise vor. Zu Beginn der Messung war der Faden entspannt, die beiden Kügelchen befanden sich direkt nebeneinander. Mit einem Konduktor wurde dann die erste Kugel (y) durch Berührung geladen, die Ladung der zweiten Kugel (x) erfolgte durch Berührung mit der ersten, auf beiden Kugeln befand sich also die gleiche Art von „Elektrizität“ in gleicher Menge. Als Folge der Aufladung entfernten sich die beiden Kugeln um einen bestimmten Winkel (36^0), in welchem sich die abstoßenden elektrostatischen Kräfte und die Torsionskraft des Fadens das Gleichgewicht halten. Im zweiten Schritt wurde der Faden so weit tordiert, dass sich der Winkelabstand der beiden Kugeln auf die Hälfte (18^0) reduzierte. Dazu war eine Torsion des Fadens um 126^0 erforderlich, die für die Torsionskraft des Fadens maßgebliche Verdrillung betrug also $126^0 + 18^0 = 144^0$. Im dritten Schritt wurden die Kugeln auf $8,5^0$ angenähert, die Torsion am Drehknopf oben betrug 567^0 , die Gesamttordierung also $567^0 + 8,5^0 = 575,5^0$. Nun war die Frage zu prüfen, ob die elektrostatischen Kräfte mit dem Quadrat des Abstandes abnehmen. Bei der gegebenen Apparatur kann der Abstand r als dem Drehwinkel proportional angesehen werden, der Torsionswinkel am oberen Ende des Fadens ist (auf der Grundlage von Coulombs vorausgegangenen Untersuchungen) der abstoßenden Kraft direkt proportional. Bei Gültigkeit des vermuteten Zusammenhanges zwischen Kraft und Abstand muss das Produkt aus Kraft (bzw. Torsionswinkel) und dem Quadrat des Abstandes (hier dem Winkel zwischen den beiden Kügelchen im Gleichgewichtsfall) konstant sein. Die vorliegenden Messergebnisse ergeben in den beiden ersten Fällen den Wert 467, im dritten den Wert 416, was von Coulomb als ausreichend für die Bestätigung seiner Annahme angesehen wurde.

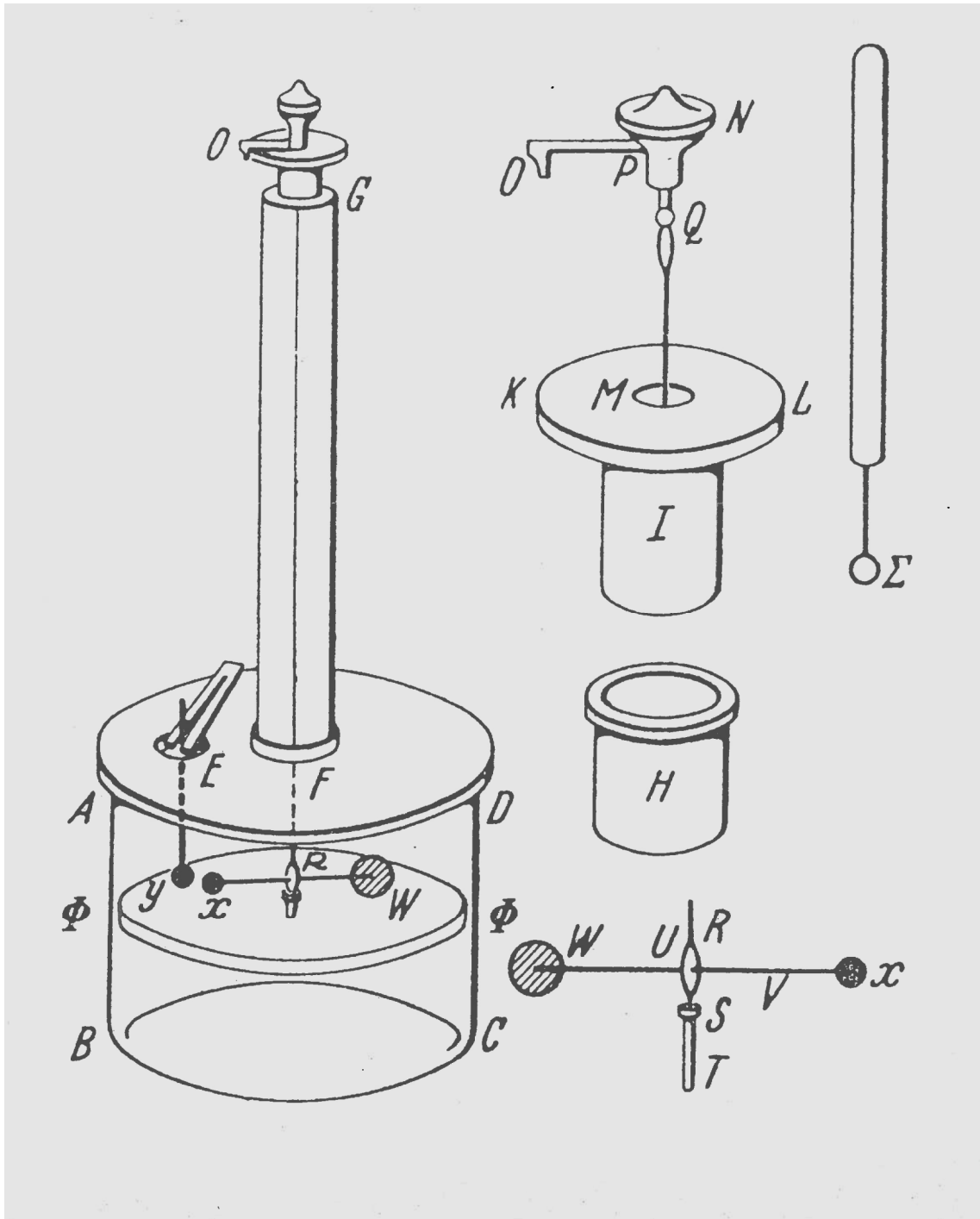


Abb. 2.1.2: Die Versuchsanordnung von Coulomb nach Ramsauer zur Messung abstoßender elektrostatischer Kräfte. Auf den beiden Kügelchen y und x befanden sich gleich große elektrische Ladungen, die daraus resultierende Abstoßung hatte eine Drehung des hantelförmigen Körpers um einen bestimmten Winkel zur Folge. Diese Drehung konnte über eine Torsion des Metallfadens am oberen Ende desselben durch Drehung des Knopfes O messbar teilweise kompensiert werden, so dass eine quantitative Aussage über den Zusammenhang der wirkenden Kräfte und den Abstand der Ladungen möglich war.

Durch die dargestellte Messung von Coulomb ist die Frage der Abstandsabhängigkeit der elektrostatischen Abstoßungskräfte geklärt, nicht dagegen das Problem des Einflusses der „Elektrizitätsmengen“. Wie schwierig diese Frage ist, kann man daran ersehen, dass der Einfluss der elektrischen Ladung auf die wirkenden Kräfte untersucht werden soll, obwohl es noch gar kein Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Ladung gibt. Die Frage berührt das Grundproblem nach dem Vielfachen einer physikalischen Größe. Zum leichteren Verständnis sei an dieser Stelle an ein analoges Problem der Mechanik erinnert. Dort stellt sich folgende Frage: Wenn ein Körper eine bestimmte Masse besitzt, wie gelangt man dann zu einem Körper, dessen Masse ein Vielfaches vom ersten beträgt? Die Antwort kann nicht durch logische Deduktion entschieden werden, sondern durch Definition: Es wird festgelegt, dass n gleiche Körper die n -fache Masse des einzelnen Körpers besitzen sollen. Entsprechend kann bei der Festlegung des Vielfachen der elektrischen Ladung verfahren werden. Zwei gleich geladene Kugeln sollen die doppelte elektrische Ladung besitzen wie eine einzige geladene Kugel. Die Vereinigung der Ladungen beider Kugeln verursacht jedoch praktische Probleme; es ist im Fall der Elektrizitätslehre (im Unterschied zur Mechanik) daher zweckmäßiger, nicht das Vielfache, sondern Bruchteile einer elektrischen Ladung zu definieren, und zwar wie folgt:

Wenn eine elektrisch geladene, metallische Kugel mit einer gleich großen, elektrisch neutralen Kugel berührt wird, so verteilt sich die elektrische Ladung auf beide Kugeln in gleicher Weise; werden die Kugeln nach Berührung getrennt, so befindet sich auf jeder Kugel die Hälfte der ursprünglichen elektrischen Ladung.

Mit dieser Definition kann man die oben gestellte Frage weiter verfolgen. Man führt eine Messreihe mit einer bestimmten Ladung auf beiden Kugeln durch und wiederholt dann die Messung mit der halben Ladung oder einem anderen bekannten

Bruchteil derselben. Auf diese Weise ist es unter Benutzung der genannten Definition des Bruchteiles (bzw. des Vielfachen) von elektrischen Ladungen möglich zu zeigen, dass der vermutete Zusammenhang für das Kraftgesetz nicht nur für den Abstand der Ladungen, sondern auch für deren Größe gilt.

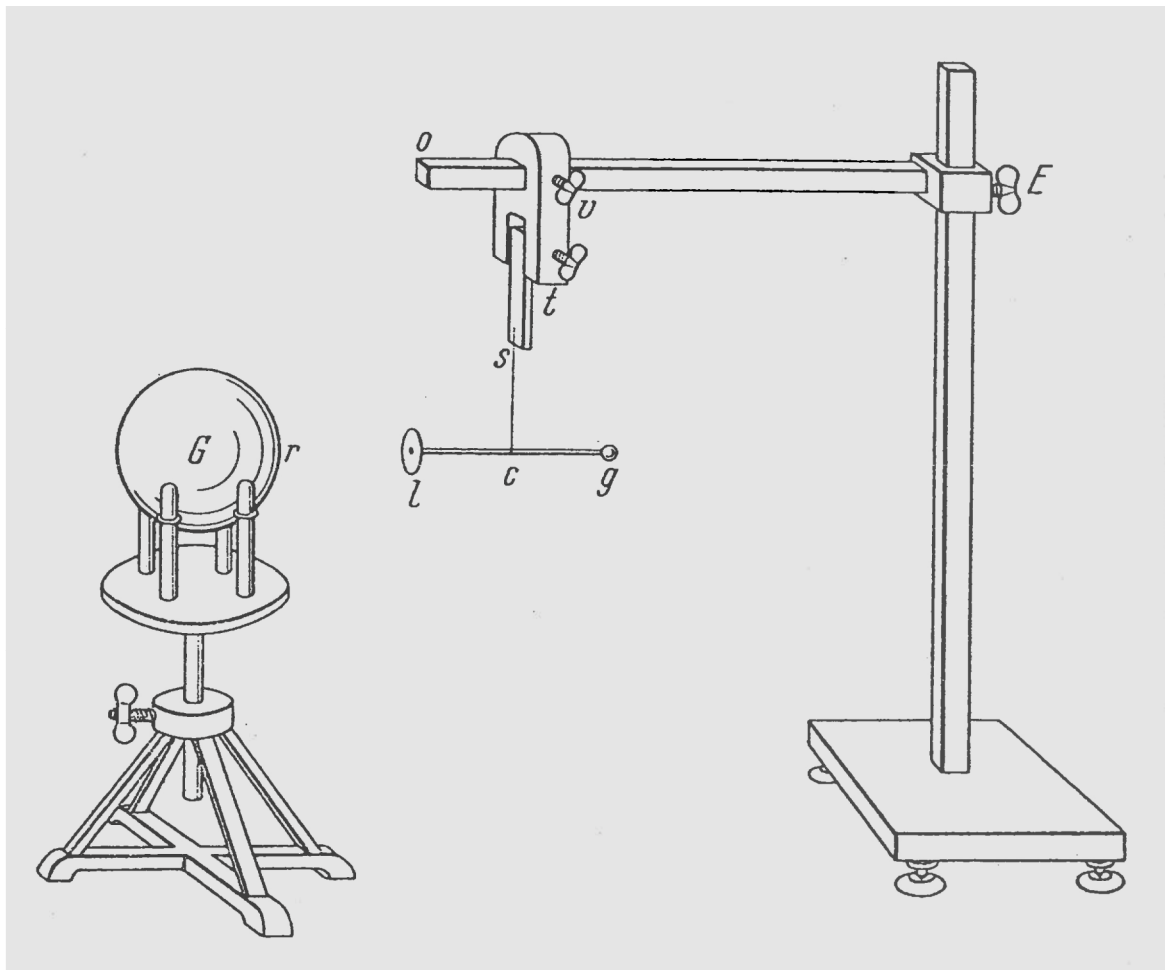


Abb. 2.1.3: Coulombs Apparatur zum Nachweis des vermuteten Zusammenhanges für anziehende elektrostatische Kräfte. Es wird zunächst die große Kugel G elektrisch geladen, dann wird das Scheibchen l mit einem Metallstab berührt und so aufgrund der Influenz mit der der Kugel entgegengesetzten Ladungsart geladen. Es kann hergeleitet werden, dass die Schwingungsdauer T des hantelförmigen Gebildes mit dem Abstand r zwischen Kugel und Scheibchen wächst, und dies wird durch das Experiment bestätigt.

Coulombs Aufgabe war damit aber noch nicht abgeschlossen, denn das Kraftgesetz für elektrostatische Ladungen war durch die bisher beschriebenen Versuche für den Fall der Abstoßung belegt, nicht aber für die Anziehung bei ungleichen Ladungsarten. Dieses Problem konnte mit der Drehwaage nicht in befriedigender Weise gelöst werden, denn es war äußerst schwierig, die Anziehung der Kugeln mit der Fadentorsion zu kompensieren, ohne dass sich die Kugeln zuvor berührten. Coulomb verzichtete daher auf diese Versuche und wählte ein anderes Messverfahren für die Anziehung. Die entsprechende Apparatur ist abgebildet. Das Wesentliche ist ein drehbar aufgehängtes hantelförmiges Gebilde mit einer kleinen Scheibe 1 aus Goldpapier. In gleicher Höhe steht seitlich davon eine große Metallkugel G, welche mit einer Leidener Flasche elektrisch aufgeladen wird. Um nun die kleine Scheibe mit der anderen Ladungsart zu laden, greift Coulomb auf die Erscheinung der elektrischen Influenz zurück. Er berührt von der Seite her die kleine Scheibe 1 mit einem Metallstab und entfernt diesen wieder; dadurch wird die Scheibe 1 mit der entgegen gesetzten Ladungsart als derjenigen auf der Kugel G geladen. Unter dem Einfluss der anziehenden elektrostatischen Kräfte vollführt das hantelförmige Gebilde eine Schwingung, deren Schwingungsdauer der Wurzel der elektrischen Anziehungskräfte umgekehrt proportional ist. Es gilt:

$$T \sim 1 / (F)^{1/2}$$

Die rücktreibende Kraft soll ihrerseits nach dem vermuteten Kraftgesetz zum Quadrat des Abstandes r der beiden elektrisch geladenen Körper (große Kugel G und Scheibe 1) umgekehrt proportional sein, so dass sich für den Zusammenhang zwischen Schwingungsdauer T und Abstand r ergibt:

$$T \sim r.$$

Coulomb prüfte diesen Zusammenhang für verschiedene Abstände und bildete den Quotienten aus Schwingungsdauer und Abstand, der sich - entsprechend der Vermutung - als konstant

erwies. Damit war das Gesetz für die elektrostatischen Kräfte auch für den Fall der Anziehung bewiesen.

Zur Festlegung der Einheit der elektrischen Ladung

Nach den Untersuchungen von Coulomb gilt folgende Gesetzmäßigkeit für die Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern:

$$F = \text{const.} (Q_1 \cdot Q_2 / r^2) .$$

Um eine Einheit für die elektrische Ladung auf der Grundlage des Coulomb'schen Gesetzes festzulegen gibt es nun zwei Möglichkeiten.

Möglichkeit 1: Die Konstante im Coulomb'schen Gesetz wird gleich 1 gesetzt. Damit ist durch die Einheiten der sonstigen physikalischen Größen der Gleichung die Einheit der Ladung festgelegt, und zwar als abgeleitete Einheit aus den Einheiten von Kraft und Länge. Im früher verwendeten cgs - System wurde auf diese Weise verfahren, man nannte die so festgelegte Einheit die „elektrostatische Einheit der Ladung“; sie lag vor, wenn zwei punktförmige Gebilde mit gleicher Ladung im Abstand von 1 cm aufeinander die Kraft 1 dyn (dies entspricht 10^{-5} N) ausüben.

Für den Zusammenhang zwischen den beiden Einheiten gilt: 1 C entspricht $3 \cdot 10^9$ elektrostatischen Einheiten.

Möglichkeit 2: Man legt die Einheit der Ladung in einer ganz bestimmten Weise fest, dann kann über die Konstante nicht mehr frei verfügt werden. Dies entspricht der Vorgehensweise im SI - System. Die folgende Festlegung kann dann getroffen werden.

Definition 1: Wenn zwei punktförmige Gebilde gleicher elektrischer Ladung im Abstand von 1 m

aufeinander die Kraft $8,99 \cdot 10^{-3} \text{ N}$ ausüben, so befindet sich auf jedem der beiden Körper die Ladung $1 \cdot 10^{-6} \text{ Coulomb}$ ($1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$).

Größe und Einheit der Konstanten liegt damit auch fest. Setzt man die Konstante gleich $1/4\pi\epsilon_0$, so ergibt sich der Wert

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}.$$

Diese im Vergleich zur Fachliteratur hier ungewohnte Einheit kann leicht in die gebräuchliche Schreibweise $\text{A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$ umgeformt werden, wenn man berücksichtigt, dass 1 V auch als 1 J C^{-1} geschrieben werden kann.

Es sei angemerkt, dass die zu Ehren von Coulomb benannte Einheit 1 C eine sehr große elektrische Ladung darstellt. Die im Schulbereich verwendeten Ladungen bewegen sich in winzigen Bruchteilen dieser Ladungseinheit, z.B. im Bereich von 10^{-9} C .

Die Größe der Ladung 1 C kann durch folgende Rechnung verdeutlicht werden. Zwei punktförmige Gebilde mit der Ladung von jeweils 1 C befinden sich im Abstand von 1 km (!). Die Kraft zwischen den beiden Ladungen beträgt dann ungefähr $10\,000 \text{ N}$ (!), was an der Erdoberfläche der Gewichtskraft von einem Kleinwagen entspricht.

Ein weiteres Beispiel zeigt das Verhältnis von Coulomb-Kräften und Gravitationskräften. Bei einem Wasserstoffatom kann man die zwischen Proton und Elektron wirkende Coulomb-Kraft und die Gravitationskraft berechnen. Das Verhältnis der Coulomb-Kraft zur Gravitationskraft beträgt $10^{39} : 1$, was die unvorstellbare Größe der Coulomb-Kräfte im Vergleich zu Gravitationskräften unterstreicht.

Nach der vorausgegangenen theoretischen Betrachtung besteht die nächste Aufgabe darin, mit einer geeigneten Vorrichtung die Größe einer elektrischen Ladung zu messen. Ausgangspunkt dazu ist das Elektroskop (welches das Vorhandensein eines elektrischen Zustandes rein qualitativ anzeigt), das zu einem Elektrometer weiterentwickelt werden muss. Die Funktionsweise

dieses Gerätes ist prinzipiell die gleiche wie diejenige des Elektroskops; zusätzlich benötigt man eine Skala, auf der die Größe der elektrischen Ladung in der Maßeinheit „Coulomb“ abgelesen werden kann. Eine Eichung der Skala ist auf der Grundlage der vorausgegangenen Definition der Ladung und ihrer Einheit möglich. Zur Vermeidung äußerer Störungen ist die Vorrichtung von einem schützenden Gehäuse umgeben. Die Abbildung zeigt ein älteres Gerät.

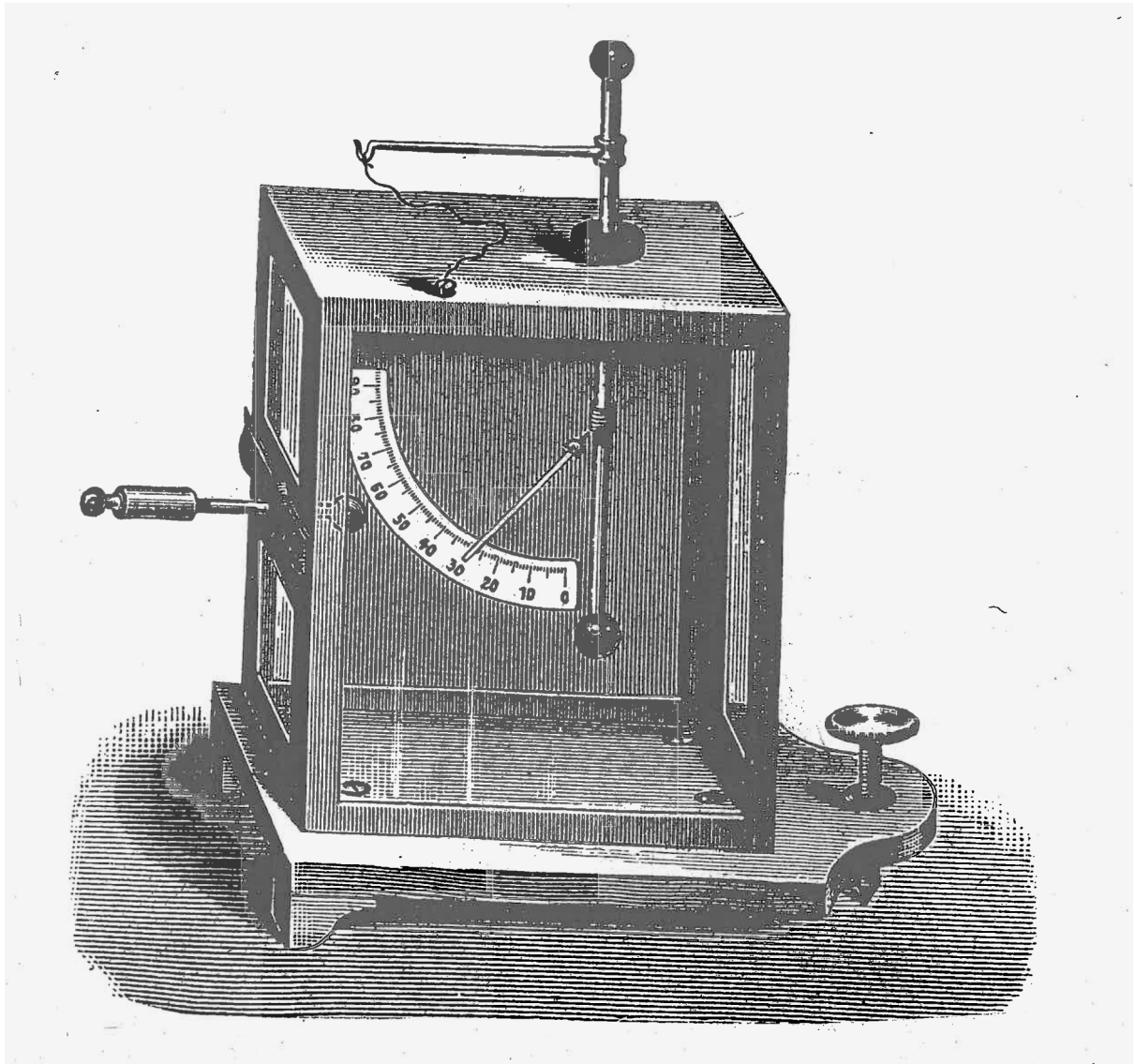


Abb. 2.1.4: Elektrometer von Bruno KOLBE (nach Grimsehl). An einem Metallstab, der isoliert an einem Gehäuse angebracht ist, befindet sich ein bewegliches Blättchen aus Aluminium, welches als Zeiger fungiert. Die zu messende elektrische Ladung wird mit Hilfe einer kleinen Probekugel auf den Knauf des Stabes aufgebracht.

Es stellt sich jedoch eine weitere Frage, wenn wir an das folgende experimentelle Problem denken. Auf einer Metallkugel (an einem Isolierstiel) befindet sich eine elektrische Ladung unbekannter Größe, und diese Ladung soll mit dem Elektrometer gemessen werden. Eine Lösung könnte wie folgt aussehen: Wir berühren mit der elektrisch geladenen Kugel den Metallstab des Elektrometers und erhalten einen Zeigerausschlag. Jetzt lautet die Frage:

Welche Ladung zeigt das Instrument an?

Um eine Antwort auf diese Frage zu finden kann man einmal die historisch geprägte Vorstellung von einem elektrischen Fluidum heranziehen, zum anderen kann man eine experimentelle Klärung anstreben. Die Vorstellung von einem elektrischen Fluidum geht davon aus, dass die elektrische Ladung von der Kugel auf den Stab und den Zeiger des Elektrometers strömt. Dabei kann man annehmen, dass nicht die gesamte elektrische Ladung der Kugel auf das Messinstrument übergeht und die Kugel dann „unelektrisch“ ist, sondern die Ladung wird sich auf die Kugel und das Elektrometer verteilen. Die folgenden Experimente sollen eine solche Verteilung klären. Wir gehen von der elektrisch geladenen Kugel aus und benützen zusätzlich eine kleine Probekugel an einem Isolierstiel. Mit dieser Probekugel berühren wir eine Stelle der Oberfläche der geladenen Kugel, dann berühren wir mit der Probekugel den Metallstab des Elektrometers. Wir erhalten am Instrument einen Zeigerausschlag, was bedeutet, dass mindestens ein Teil der Ladung von der Probekugel auf das Messinstrument übergegangen ist. Dann wiederholen wir diesen Vorgang, indem wir nacheinander möglichst viele Stellen der Oberfläche der geladenen Kugel mit der Probekugel berühren. Wir erhalten dann stets einen Zeigerausschlag des Messinstruments. Daraus kann man eine wichtige Schlussfolgerung ziehen.

Ergebnis: Die elektrische Ladung verteilt sich gleichmäßig auf der Oberfläche einer Metallkugel.

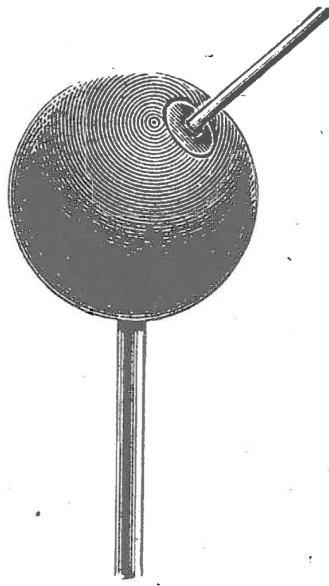


Abb. 2.1.5: Zur Übertragung der elektrischen Ladung von einem Metallkörper auf einen anderen dient eine kleine Probekugel an einem Isolierstiel.

Um die Frage nach der Ladungsverteilung im Inneren der Metallkugel untersuchen zu können wählen wir eine Hohlkugel mit einer kleinen Öffnung, durch welche die Probekugel in das Innere der Hohlkugel eingeführt werden kann. Jetzt laden wir die Hohlkugel und führen die Probekugel in das Innere der Hohlkugel ein, berühren mit der Probekugel die Innenwand der großen Kugel und anschließend den Stab des Elektrometers. Es erfolgt kein Zeigerausschlag des Messinstruments. Das bedeutet, dass sich im Innenraum der elektrisch geladenen Hohlkugel keine Ladungen befinden. Erklären können wir dieses Ergebnis durch die Annahme der Existenz von leicht verschiebbaren Ladungsträgern in Metallen. Befindet sich die große Kugel beispielsweise in einem elektrisch negativ geladenen Zustand, so stoßen sich alle Ladungsträger gegenseitig ab und sammeln sich an der Kugeloberfläche. Folglich befinden sich im Inneren einer elektrisch geladenen massiven Metallkugel keine verschiebbaren Ladungsträger. Dies lässt sich durch ein entsprechendes Experiment direkt beweisen.

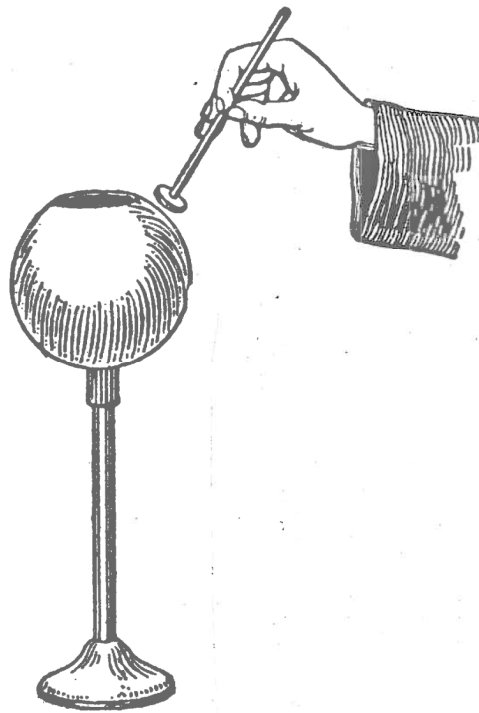


Abb. 2.1.6: Zur Klärung des Sitzes von elektrischen Ladungen (nach Grimsehl). Man berührt die Innenseite einer elektrisch geladenen Hohlkugel mit einer („unelektrischen“) Probekugel und dann mit dieser den Metallstab des Elektrometers. Es erfolgt kein Zeigerausschlag des Messinstrumentes, also befinden sich im Inneren einer Hohlkugel keine elektrischen Ladungen.

Die vorausgegangene Betrachtung eröffnet uns jetzt zwei Messverfahren zur Bestimmung der elektrischen Ladung einer Metallkugel.

Fall 1:

Die große Metallkugel ist elektrisch geladen. Die Ladung soll gemessen werden und dabei soll durch den Messvorgang die Ladung der Kugel (de facto) nicht verändert werden.

Vorgehensweise: Man berührt mit der kleinen (elektrisch neutralen) Probekugel die Oberfläche der geladenen großen Kugel und danach den Metallstab des Elektrometers. Das Instrument zeigt einen Ausschlag, der davon herrührt, dass ein Teil der Ladung der Probekugel auf den Metallstab und das Alu-Blättchen des Elektrometers übergegangen ist. Daraus lässt sich die Ladung

am Elektrometer bestimmen; aus einem Vergleich der wirksamen Metalloberflächen von Elektrometer und Probekugel kann man dann die Ladung der Probekugel ermitteln. Im nächsten Schritt vergleicht man die Größe der Oberflächen von Probekugel und großer geladener Kugel und kann daraus schließlich die Ladung der großen Metallkugel berechnen. Heute benützt man einen Messverstärker mit einem angeschlossenen Vielfachinstrument und kann auf diese Weise die Messung in einem einzigen Schritt durchführen.

Fall 2

Man will die Ladung auf der großen Kugel messen und nimmt dabei in Kauf, dass durch den Messvorgang die Ladung auf der Kugel stark verändert wird.

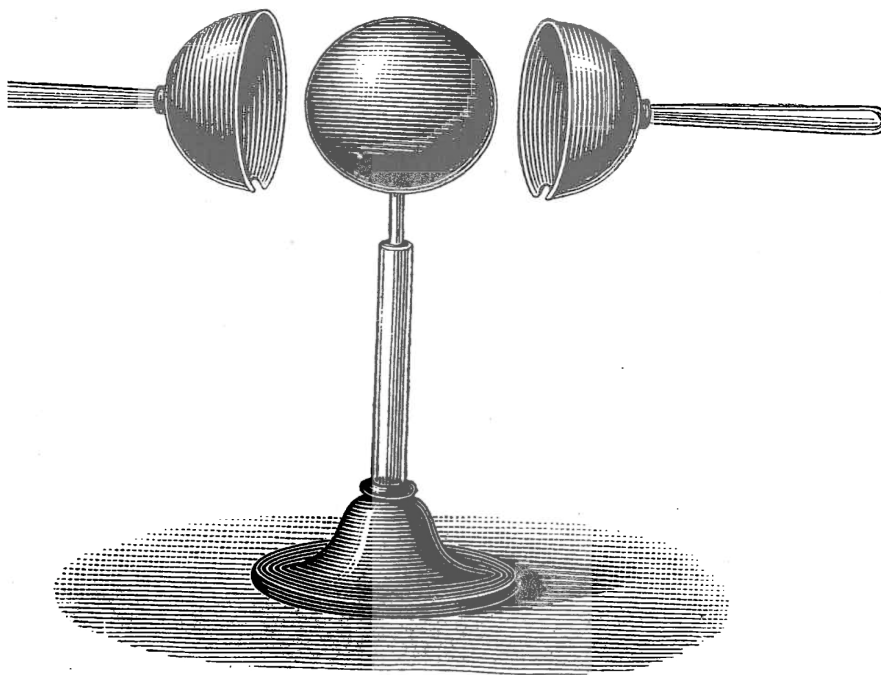


Abb. 2.1.7: Zum Nachweis des Sitzes der Ladungen an der Oberfläche eines Leiters (nach LaCour/Appel). Eine isoliert aufgestellte geladene Metallkugel wird von einer aus zwei Teilen bestehenden Hohlkugel umschlossen (Die massive innere Kugel und die Hohlkugeln müssen sich berühren). Entfernt man die beiden Hälften der Hohlkugel, so zeigt sich, dass die innere Kugel „unelektrisch“ ist und die beiden Hohlkugeln elektrisch geladen sind.

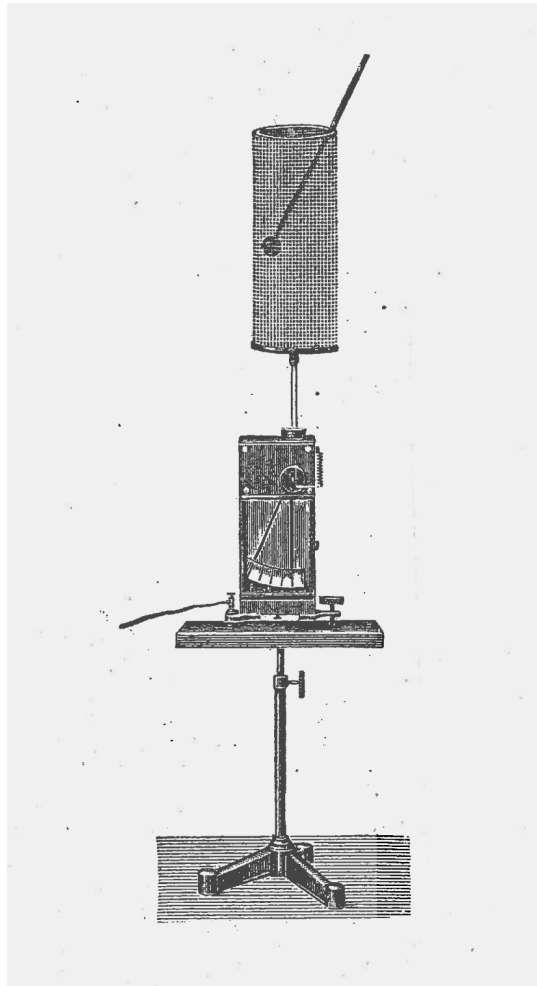


Abb. 2.1.8: „Faraday’scher Becher“ (nach Grimsehl). Mit Hilfe dieser Vorrichtung können elektrische Ladungen vollständig einem Elektrometer zugeführt werden; dazu müssen die elektrischen Ladungen auf die Innenseite eines metallischen Hohlkörpers gebracht werden. Dieser Hohlkörper muss mit dem Metallstab des Elektrometers leitend verbunden sein.

Vorgehensweise: Die Ladung auf der großen Kugel lässt sich vollständig auf das Elektrometer übertragen. Dazu benutzt man die Kenntnis, dass sich die leicht verschiebbaren Ladungen eines metallischen Hohlkörpers an seiner Außenseite ansammeln. Setzt man also auf den Metallstab des Elektrometers einen oben offenen Metallbecher, einen sogenannten Faraday’schen Becher, und verbindet die geladene Metallkugel elektrisch leitend mit dem Inneren des Bechers, so fließen alle Ladungen von der Kugel in das Innere des Bechers und von dort an dessen Außenfläche. Damit ist die gesamte zu messende elektrische Ladung auf das Elektrometer übergegangen.

1.3 Eine weitere Möglichkeit zur Trennung elektrischer Ladungen – Die elektrische Influenz

In den vorausgegangenen Darlegungen war ausgeführt worden wie Körper elektrisch geladen werden können. Grundlage dieser Vorgehensweise war die sogenannte „Kontaktelektrizität“: Zwei Körper, die wir in der heute gebräuchlichen Ausdrucksweise als Isolatoren bezeichnen, werden zunächst in engen Kontakt gebracht (z.B. eine Schallplatte und eine Plastikfolie) und dann getrennt. Nach der Trennung befinden sich die beiden Körper in unterschiedlichen elektrischen Zuständen, sie sind „unterschiedlich elektrisch geladen“. Charakteristisch bei dieser Vorgehensweise ist die Tatsache, dass beide Körper im Ausgangszustand elektrisch neutral sind und sich nach dem Prozess in zwei unterschiedlichen elektrischen Zuständen befinden.

Eine andere Methode, zwei Körper „elektrisch geladen“ zu machen, ist die folgende: Man geht aus von einem geladenen Plattenkondensator und bringt in das Feld zwischen den Platten zwei (je an einem Isolierstiel befestigte) aneinander gepresste Metallplättchen. Dann trennt man die Plättchen und führt sie (quer zur Feldrichtung) aus dem elektrischen Feld heraus. Es zeigt sich, dass die beiden Plättchen Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens tragen. Diese (auf Gustav MIE, um 1910, zurückgehende) Methode der Trennung von Trägern unterschiedlicher Ladungsart beruht auf der Wirkung von bereits getrennten Ladungsträgern (hier vorhanden im geladenen Kondensator) und wird als „elektrische Influenz“ bezeichnet. Nähere Einzelheiten dieses Verfahrens sind im Anhang dargestellt.

Unter elektrischer Influenz versteht man die Trennung von Trägern elektrischer Ladungen unter dem Einfluss von bereits getrennten elektrischen Ladungen.

Eine Variante dieser Methode ist in der nachfolgenden Abbildung beschrieben.

Ein elektrisch neutraler Metallstab ist an einem Isolierstiel waagerecht befestigt. In der Verlängerung der Achse des Stabes (in der Abbildung links) steht eine elektrisch positiv geladene Metallkugel auf einem Isolierstiel. Man erhält das folgende experimentelle Ergebnis: Die an beiden Enden des Metallstabes hängenden kleinen Metallkugelchen stoßen sich ab, sie tragen also elektrische Ladungen jeweils gleichen Vorzeichens. Eine weitere Untersuchung zeigt, dass das der positiv geladenen Metallkugel zugewandte Ende des Stabes negativ geladen und das abgewandte Ende positiv geladen ist. Der Versuch demonstriert somit die Trennung von Trägern elektrischer Ladungen unter dem Einfluss von bereits getrennten Ladungsträgern, also das Phänomen der elektrischen Influenz.

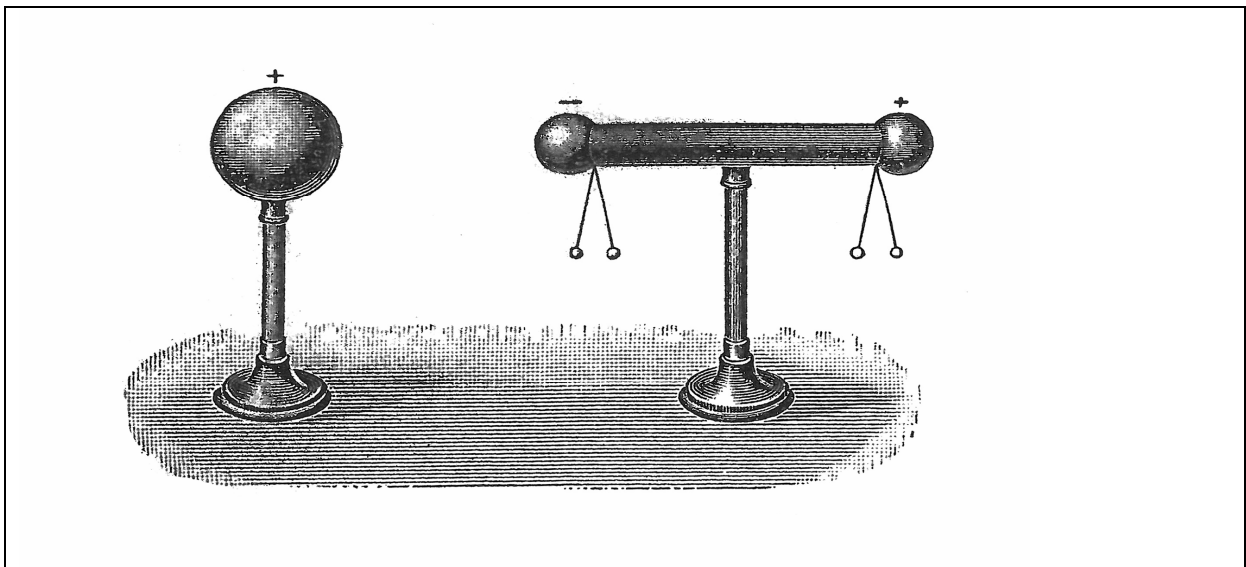


Abb. 2.1.9: Elektrische Influenz (nach M.W. Meyer). Unter dem Einfluss der positiv geladenen Kugel (links) werden Ladungsträger beiderlei Vorzeichens im Metallstab (rechts) getrennt, sie sammeln sich an den Enden des Stabes an. Die dort hängenden Pendelkörper tragen jeweils Ladungen gleichen Vorzeichens und stoßen sich daher ab.

2. Ruhende Ladungsträger - Zur Beschreibung der Phänomene ist eine weitere Größe erforderlich

In der vorausgegangenen Betrachtung wurde ein wesentlicher Begriff der Elektrizitätslehre angesprochen, nämlich die elektrische Ladung. Ein weiterer grundlegender Begriff, dessen Behandlung hier folgen soll, ist die elektrische Spannung. Nachfolgend soll die mit der Behandlung dieses Begriffes verbundene Problematik aufgezeigt und nach einem für die Sekundarstufe I geeigneten Lösungsweg gesucht werden.

2.1 Das bestehende Problem

Die Behandlung der elektrischen Spannung im Physikunterricht ist ein großes Problem, das sich auf zwei Ebenen von unterschiedlichem Niveau bewegt. Zum einen kann man die Entstehung einer elektrischen Spannung dadurch erklären, dass elektrische Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens getrennt werden und dass die dazu aufgewandte Energie danach für andere Prozesse zur Verfügung steht. Andererseits kann nach den Maxwell'schen Gleichungen eine elektrische Spannung auch ohne getrennte Ladungen – nämlich auf Grund eines sich im Laufe der Zeit ändernden Magnetfeldes - existieren. Während in der Sekundarstufe II diese Aufgabe fachlich korrekt mit Hilfe des Begriffes der elektrischen Feldstärke bewältigt werden kann, so steht in der Sekundarstufe I diese Möglichkeit nicht ohne Weiteres zur Verfügung. Die bisher vorliegenden Lösungsvorschläge für die Sekundarstufe I lassen Wünsche offen. Es wird daher an dieser Stelle nach einem Weg gesucht, welcher für diese Schulstufe geeignet ist und der bei der Erarbeitung des Begriffes der elektrischen Spannung ohne den Feldbegriff

auskommt. Die didaktischen Positionen zu dieser Frage sind recht unterschiedlich und sollen kurz charakterisiert werden.

- Man vertritt die Auffassung, dass eine fachwissenschaftlich korrekte Behandlung der physikalischen Größe „elektrische Spannung“ nur auf der Grundlage des Begriffes der elektrischen Feldstärke möglich ist. Eine Behandlung in der Sekundarstufe I scheidet damit aus, der Begriff „elektrische Spannung“ kann folglich erst in der Sekundarstufe II eingeführt werden.
- Die elektrische Spannung ist ein zentraler Begriff der Elektrizitätslehre. Wenn dieser Begriff nicht angemessen behandelt werden kann, so ergibt sich daraus in letzter Konsequenz, dass im Physikunterricht der Sekundarstufe I auf die Behandlung der gesamten Elektrizitätslehre verzichtet werden sollte.
- Wenn eine begrifflich geschlossene Behandlung der Elektrizitätslehre in der Sekundarstufe I nicht möglich ist, so kann alternativ eine operationalisierende Betrachtungsweise gewählt werden. In diesem Fall werden die für die Schaltungs- und Messtechnik erforderlichen Geräte vorgestellt und ihre Handhabung eingeübt. Auf ein weitergehendes Verständnis der zu Grunde liegenden Sachverhalte wird bewusst verzichtet.
- Man versucht, wesentliche Begriffe der Elektrizitätslehre – also auch insbesondere den Begriff der elektrischen Spannung – durch die Entwicklung schülergemäßer Modellvorstellungen zu verdeutlichen. Dies geschieht im Bewusstsein der Tatsache, dass Modellvorstellungen stets im Hinblick auf ganz bestimmte Problemstellungen entwickelt werden und dass Modelle folglich nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich besitzen. Für unterschiedliche Fragestellungen ein und desselben Teilgebietes der Physik (hier der Elektrizitätslehre) können Modelle bestehen,

welche nicht miteinander kompatibel sind. Daraus darf aber nicht der Schluss gezogen werden, diese Modellvorstellungen seien unzulässig und dürften nicht verwendet werden. Die Optik mit der Wellenvorstellung einerseits und der Lichtquantenvorstellung andererseits – also mit Modellvorstellungen, die sich gegenseitig ausschließen - ist dafür ein bekanntes Beispiel.

Zu diesen Konsequenzen seien die folgenden Anmerkungen gestattet.

- Die Aussage, man möge auf die Behandlung der Elektrizitätslehre im Unterricht der Sekundarstufe I verzichten, mag folgerichtig sein, sie ist jedoch – mindestens nach dem aktuellen Diskussionsstand – unrealistisch, denn die Behandlung der Elektrizitätslehre ist nicht nur ein verbindlicher Bestandteil der Bildungspläne, sie ist auch mit Blick auf unsere Umwelt dingend geboten.
- Der Vorschlag einer operationalisierenden Vorgehensweise vermeidet die begrifflichen Lernschwierigkeiten, er verzichtet jedoch auf wesentliche Bildungsziele des Physikunterrichtes. Eine voll zufriedenstellende Lösung kann dies nicht sein.
- Die Suche nach geeigneten Modellvorstellungen für die Schüler ist ein steiniger Weg, aber er ist wohl der einzige, wenn man der Ansicht ist, dass die Elektrizitätslehre als wichtiges Teilgebiet der Physik mit ihrer großen Bedeutung im Leben der Menschen auch im Unterricht ihren Platz besitzen sollte. Die gegenseitige Unverträglichkeit benutzter Modellvorstellungen im Hinblick auf unterschiedliche Teilprobleme muss nicht unbedingt als Nachteil gesehen werden; es ist vielmehr auch für den Schüler eine wichtige Erkenntnis, dass Naturvorgänge sehr verwickelt sind und dass die Naturwissenschaft - hier die Physik - diese komplexen Sachverhalte nur mit Hilfe von vereinfachenden und

idealisierenden Annahmen erfassen kann. Dass eine solche Betrachtungsweise an Grenzen stößt, weil sie auf ganz bestimmten Voraussetzungen aufbaut und deshalb auch nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich beanspruchen kann, ist eine wichtige Einsicht, welche dem Schüler durchaus vermittelt werden sollte.

2.2 Eine experimentelle Erfahrung und ihre Folgerung - Der Weg zum Begriff der elektrischen Spannung

Im Unterricht der Sekundarstufe I ist die Behandlung der elektrischen Spannung eine schwierige Aufgabe. Eine didaktische Position vertritt die Auffassung, dass eine korrekte Behandlung dieser Größe nur mit Hilfe der Vorstellung des elektrischen Feldes möglich ist. Ein Problem in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass der Feldbegriff in der Sekundarstufe I in der Regel nicht zur Verfügung steht. Dieser Position soll hier die These gegenüber gestellt werden, dass eine angemessene Behandlung der elektrischen Spannung in der Sekundarstufe I ohne den Feldbegriff möglich ist, wenn der wissenschaftshistorische Weg in geeigneter Weise beschritten wird. Damit ist gemeint, dass die historische Entwicklung nicht in streng chronologischer Weise nachvollzogen werden soll; vielmehr soll dieser Weg der Erkenntnisgewinnung in methodischer Hinsicht so aufbereitet werden, dass für die Schüler eine altersgemäße Erarbeitung des Begriffes der elektrischen Spannung möglich ist. Diese „historisch – genetische Methode“ knüpft an die geschichtliche Entwicklung an, welche nach Vorarbeiten in der Antike u.a. durch Otto von Guericke um 1650 mit seinen elektrostatischen Versuchen fortgesetzt wurde. Die weitere Entwicklung führte über die

Vorstellung eines „elektrischen Fluidums“ letztlich zum Begriff der elektrischen Ladung, welche man in vereinfachender Form für die Schüler zunächst als „eine bestimmte Menge an Elektrizität“ bezeichnen kann. Für die weitere Erkenntnisgewinnung war es dann sehr wichtig, dass ein Messinstrument entwickelt wurde – das Elektroskop – welches es gestattete, „Elektrizitätsmengen“ zu vergleichen. Eine Messung in der Einheit „Coulomb“ war zwar noch nicht möglich, wohl aber die Feststellung, dass zwei „Elektrizitätsmengen“ (bzw. elektrische Ladungen) gleich groß sind oder dass die eine Ladung größer ist als die andere.

Die Möglichkeit, Elektrizitätsmengen messend zu vergleichen, führte dann Giacomo BECCARIA (1753 und 1772) und Henry CAVENDISH (1771/72) unabhängig von einander zu einer für die Begriffsbildung der elektrischen Spannung entscheidenden experimentellen Erfahrung: Wenn sich auf zwei unterschiedlich großen Konduktorkugeln die gleich große elektrische Ladung („Elektrizitätsmenge“) befindet, so können von der kleineren Konduktorkugel elektrische Funken ausgehen, während dies unter den gleichen Bedingungen bei der großen Kugel nicht der Fall ist. Der beobachtete Vorgang führt bei derjenigen Kugel, von welcher Funken ausgehen, zu einer Verkleinerung der darauf befindlichen Elektrizitätsmenge.

Diese experimentelle Erfahrung gibt Anlass zu der folgenden

Vermutung:

Für die vollständige Beschreibung der bis dahin in der Elektrostatik beobachteten Phänomene reicht der Begriff der elektrischen Ladung nicht aus.

Für den Aufbau eines physikalischen Begriffssystems
ist noch eine weitere Größe erforderlich
(zusätzlich zur elektrischen Ladung).

Experimentelle Realisierung

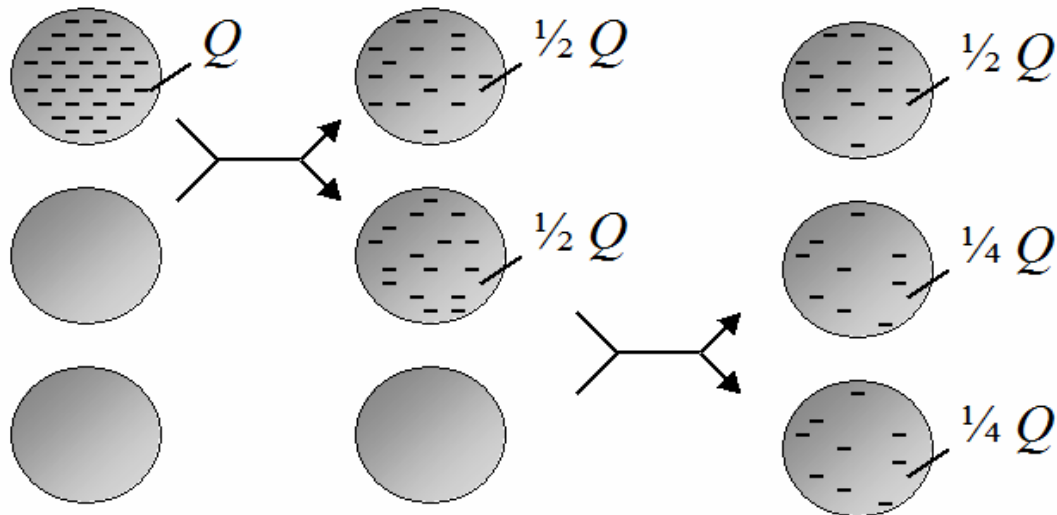
Als nächstes stellt sich die Aufgabe einen Versuch zu entwickeln, welcher es ermöglicht, die Untersuchungen von BECCARIA und CAVENDISH mit einfachen Geräten nachzuvollziehen. Wenn man die Schwierigkeiten der damaligen Forscher verstehen und ihre Leistung würdigen will, so darf man für das geplante Vorhaben auch nur diejenigen Hilfsmittel heranziehen, welche damals verfügbar waren. Das Problem ist also sehr schwierig, denn man soll zwei Konduktorkugeln unterschiedlicher Radien mit jeweils der gleichen „Elektrizitätsmenge“ aufladen, obwohl ein hinreichend empfindliches Gerät zur Messung der elektrischen Ladung nicht zur Verfügung steht.

Eine Lösung des Problems kann gefunden werden, wenn man auf die Vorstellung des „elektrischen Fluidums“ zurückgreift und ähnliche Überlegungen anstellt wie sie hier bei der Analyse des Coulomb-Gesetzes vorgenommen wurden. Der Gedankengang ist der folgende: Man lädt eine Metallkugel (die sich an einem Isolierstiel befindet) elektrisch auf (z.B. mit Hilfe einer Elektrysiermaschine). Dann berührt man die geladene Kugel mit einer „unelektrischen“ gleich großen Kugel und trennt die beiden. Nach den hier vorgestellten historischen Überlegungen und Kenntnissen kann man dann davon ausgehen, dass beide Kugeln die gleiche Ladung Q besitzen.

Diese beiden geladenen Kugeln stellen die Ausgangslage dar, durch ihre weitere Verwendung sollen zwei Kugeln unterschiedlicher Radien mit einer gleich großen elektrischen Ladung versehen werden. Dies geschieht durch die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise. Die erste Kugel mit der Ladung Q wird mit einer gleich großen elektrisch neutralen Kugel berührt, dann erfolgt die Trennung der beiden Kugeln. Auf jeder

der beiden Kugeln befindet sich jetzt die Ladung $(1/2) Q$. Wiederholt man diesen Vorgang so erhält man eine Kugel (mit dem größeren Radius R) und mit der Ladung $(1/4) Q$.

Experimentelles Ziel: Ladung $\frac{1}{4} Q$ auf großer Kugel



Experimentelles Ziel: Ladung $\frac{1}{4} Q$ auf kleiner Kugel

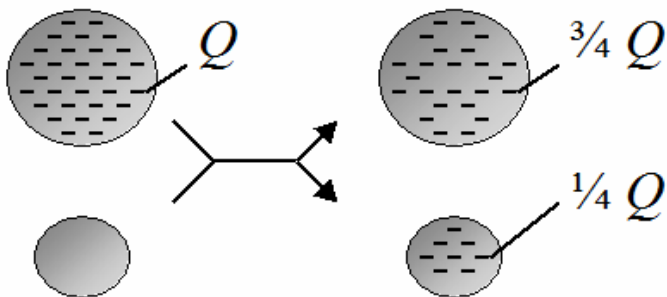


Abb. 2.2.1: Experimentelle Vorgehensweise, um zwei Konduktorkugeln unterschiedlicher Radien mit einer gleich großen elektrischen Ladung zu versehen. Dazu wird eine Kugel beliebig stark geladen (z.B. mit einer „Elektrisiemaschine“). Durch Berührung und Trennung dieser Kugel mit elektrisch neutralen Kugeln gleicher sowie passender kleinerer Größe erhält man schließlich zwei Kugeln von unterschiedlich großen Radien, welche die gleiche Ladung besitzen. Eine Kenntnis der Größe dieser Ladung ist für den Versuch nicht erforderlich.

Im nächsten Schritt soll die kleinere Kugel (mit dem Radius r) die Ladung $(1/4) Q$ erhalten. Dazu nimmt man die zweite große Kugel mit der Ladung Q , bringt sie in Berührung mit der elektrisch neutralen Kugel von kleinerem Radius

$$r = (1/3) \sqrt{3} \cdot R$$

und trennt die Kugeln dann. Ist der kleinere Radius entsprechend gewählt, so befindet sich nach Trennung der beiden Kugeln auf der kleineren Kugel die Ladung $(1/4) Q$. Diese Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass sich das „elektrische Fluidum“ (In heutiger Ausdrucksweise: Die beweglichen Träger elektrischer Ladungen) bei der Berührung von zwei Metallkugeln gleichmäßig dicht auf die beiden Kugeloberflächen verteilt. Die Experimente des 18. Jahrhunderts stützen diese Schlussweise.

Hier besteht Anlass eine Bemerkung zur Sicherheit naturwissenschaftlicher Erkenntnis anzubringen. Eine physikalische Theorie kann man falsifizieren, aber nicht verifizieren. Fügt sich eine Theorie widerspruchsfrei in das Gedankengebäude der Physik ein, so wird man sie – nach dem aktuellen Kenntnisstand - als zutreffend anerkennen. Dies ist allerdings kein Beweis für ihre Richtigkeit, denn spätere Erkenntnisse können Korrekturen erfordern (wie Relativitätstheorie und Quantenphysik zeigten). Die obigen Überlegungen sind sinngemäß zu verstehen.

Jetzt kann der entscheidende Teil des Versuches durchgeführt werden. Man verbindet eine metallische Spitze leitend mit der Erde und nähert diese Spitze der geladenen kleinen Kugel. Es zeigt sich, dass zwischen der kleinen geladenen Kugel und der Spitze bei relativ großem Abstand ein Funke überspringt. Wiederholt man diesen Vorgang mit der größeren Kugel, so erfolgt bei gleichem Abstand zwischen Spitze und Kugel

kein Funkenüberschlag. Dieses experimentelle Ergebnis legt den Schluss nahe, dass zur vollständigen Beschreibung elektrostatischer Phänomene außer der elektrischen Ladung noch ein weiterer physikalischer Begriff benötigt wird.

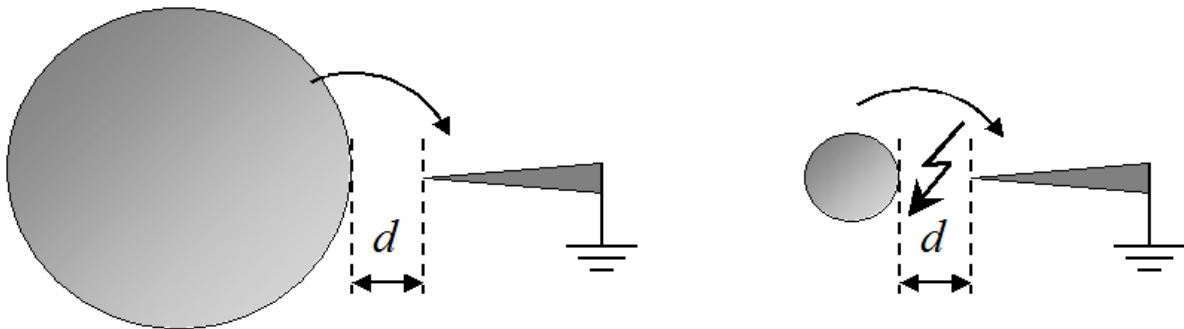


Abb. 2.2.2: Auf zwei Kugeln unterschiedlicher Radien befindet sich jeweils eine gleich große elektrische Ladung. Nähert man eine geerdete Metallspitze den Kugeln, so erfolgt in einem bestimmten Abstand bei der kleineren Kugel ein Funkenüberschlag, bei der größeren Kugel dagegen nicht. Daraus muss der Schluss gezogen werden, dass zu einer vollständigen Beschreibung des Phänomens außer der elektrischen Ladung noch eine weitere Größe erforderlich ist.

Erarbeitung eines geeigneten Begriffes

Nachdem in der vorausgegangenen Darstellung ein neues, bis dahin unbekanntes Phänomen geschildert wurde, ergibt sich als nächster Schritt in der Erkenntnisgewinnung die Aufgabe, den beobachteten Sachverhalt näher zu untersuchen und nach Möglichkeit zu deuten.

Das geschilderte Phänomen – bei der großen Metallkugel bleibt die elektrische Ladung unverändert erhalten, bei der kleineren Metallkugel sprühen Funken, die Ladung verkleinert sich – ist mit

dem Begriff der „Elektrizitätsmenge“ (elektrischen Ladung) allein nicht zu deuten. Um zu einer Deutung zu gelangen, soll hier die chronologische Sicht verlassen und das Phänomen – mindestens teilweise – vom heutigen Kenntnisstand aus betrachtet werden. Wir haben es mit zwei Systemen – einer großen und einer kleinen Kugel – zu tun. Beide Kugeln sind in gleicher Weise elektrisch geladen, sie stellen also jeweils ein System mit einer bestimmten Energie dar. Von der kleineren Kugel gehen elektrische Funken aus, d.h. diese Kugel gibt Energie nach außen hin ab, ihre Gesamtenergie wird kleiner (der Vorgang wird nach einer gewissen Zeit zum Stillstand kommen). Anders ist es bei der großen Kugel, ihre Energie bleibt konstant (bei Annahme einer idealen elektrischen Isolierung gegenüber der Umgebung).

Der Vorgang der Energieabgabe bei einer elektrisch geladenen Kugel ist schwierig zu erfassen; um das Problem übersichtlicher zu gestalten soll daher nicht der Vorgang der Entladung, sondern der umgekehrte Fall, nämlich die Aufladung beider Kugeln, untersucht werden. Dabei wollen wir den Aufladevorgang modellmäßig so betrachten, dass wir sagen: Wir bringen kleine, elektrisch geladene Partikel, z.B. Elektronen, auf die beiden Kugeln, und zwar auf beide Kugeln die gleiche Anzahl von Elektronen. Sind die Kugeln zu Beginn des Ladevorganges ungeladen, so wird es verhältnismäßig leicht sein, die ersten Elektronen aufzubringen, da die Kugeloberfläche (auf welcher sich die Elektronen sammeln) noch sozusagen „leer“ ist. Das Aufbringen einer weiteren Portion von Elektronen ist etwas schwieriger, da sich die bereits anwesenden Ladungsträger gegen das Eindringen weiterer gleicher elektrischer Teilchen zur Wehr setzen; der Grund liegt in der abstoßenden Kraft zwischen Ladungsträgern gleicher Ladungsart (Coulomb – Gesetz). Je mehr Ladungsträger in weiteren Schritten auf eine Kugel aufgebracht

werden sollen, umso schwieriger wird dieser Vorgang. In die Betrachtungsweise der Physik übertragen bedeutet dies: Das Aufbringen von Elektronen auf die Kugeln erfordert Energie, und zwar ist diese erforderliche Energie um so größer, je mehr Elektronen insgesamt (allgemein: je mehr Ladungsträger gleichen Vorzeichens insgesamt) auf die Kugeln aufgebracht werden sollen. Als Ergebnis des Aufladevorganges kann man also festhalten: Je mehr Elektronen auf eine Kugel aufgebracht werden, desto größer ist (nach Beendigung dieses Vorganges) die Energie des Systems.

Bei dieser Analyse haben wir für den Ladevorgang nur einen einzigen Parameter betrachtet, nämlich die Anzahl der aufgetragenen Elektronen. Es stellt sich die Frage, ob dieser eine Parameter zur vollständigen Beschreibung des Phänomens ausreicht, wenn zwei Kugeln unterschiedlicher Größe aufgeladen werden und die betreffenden Energiewerte dann miteinander verglichen werden sollen.

Einen Hinweis auf einen möglichen weiteren Parameter liefert uns eine Modellbetrachtung. Nehmen wir folgendes Beispiel aus dem Alltag: In einen großen Bus sollen 40 Personen einsteigen; das „Einbringen“ dieser Anzahl von Fahrgästen in das geräumige Fahrzeug dürfte ohne große Schwierigkeiten möglich sein. Das „Einbringen“ von 40 Personen in einen deutlich kleineren Bus ist schon sehr viel schwieriger, man muss die Fahrgäste „gewaltsam hinein quetschen“. Physikalisch gesehen bedeutet der Vergleich folgendes: Jeder Bus hat ein bestimmtes Fassungsvermögen, eine bestimmte „Kapazität“ für Fahrgäste. Das Fassungsvermögen des großen Busses ist wesentlich größer als dasjenige des kleinen Busses. Wenn also in den kleinen Bus genau so viele Fahrgäste hineingebracht werden sollen wie in den großen Bus, so müssen die Fahrgäste gewaltsam dazu gezwungen werden. Übertragen

auf unsere Metallkugeln bedeutet dies: Auf der großen Metallkugel haben viel mehr Elektronen Platz als auf der kleinen Metallkugel. Wenn also auf die kleine Metallkugel die gleiche Anzahl von Elektronen aufgebracht werden soll wie auf die große Metallkugel, so ist im Fall der kleinen Metallkugel dazu eine wesentlich **größere Energie** erforderlich als bei der großen Metallkugel. Mit anderen Worten: Bei gleich großer elektrischer Ladung auf ihrer Oberfläche besitzt das System „kleine Kugel“ eine größere Energie als das System „große Kugel“.

Mit dieser Betrachtungsweise dürfte auch geklärt sein, warum bei der kleinen geladenen Kugel ein Funkensprühen zu beobachten ist und warum dies bei der großen Kugel mit der gleich großen elektrischen Ladung nicht der Fall ist. Damit ist allerdings die Frage nach einem geeigneten physikalischen Begriff für die beobachteten Phänomene noch nicht geklärt. Zwar steht fest, dass im betrachteten Fall außer der elektrischen Ladung auch noch die dabei beteiligte Energie zur Beschreibung mit herangezogen werden muss, doch es stellt sich die Frage, ob die bisherige Analyse ausreicht. Darum wollen wir zu unserer Modellbetrachtung zurück kehren. Wir hatten festgestellt, dass man insgesamt relativ viel Energie benötigt um 40 Personen in einen großen Bus hinein zu bringen (dies deshalb, weil die Zahl der Fahrgäste groß ist). Soll in diesen Bus noch ein weiterer Fahrgast aufgenommen werden, so ist zusätzliche Energie nötig; diese zusätzliche Energie wird aber im Verhältnis zu der bereits aufgewandten Energie klein sein. Betrachten wir weiter einen mit vier Personen besetzten PKW. In diesen soll ein weiterer Fahrgast einsteigen; da das Fahrzeug nur wenigen Personen Platz bietet, so ist die für den zusätzlichen Fahrgast erforderliche Energie verhältnismäßig groß.

Vergleichen wir jetzt die Lage bei dem Bus und bei dem PKW, so ergibt sich folgendes Bild: Die Gesamtenergie zur Unterbringung der 40 Fahrgäste ist groß, die zusätzliche Energie für den 41. Fahrgast ist im Vergleich dazu klein; bei dem PKW ist die Gesamtenergie zur Unterbringung der vier Fahrgäste klein (im Vergleich zu der Energie für die Unterbringung der 40 Fahrgäste im Bus), jedoch ist bei dem PKW die zusätzlich erforderliche Energie zur Unterbringung des fünften Fahrgastes viel größer als die entsprechende Energie zur Unterbringung des 41. Fahrgastes im Bus. Es ist offensichtlich, dass man die beiden sehr unterschiedlichen Situationen nicht direkt mit einander vergleichen kann. Wünscht man dennoch einen Vergleich, so ist neben der aufzuwendenden Energie (und zwar der Gesamtenergie und der zusätzlichen Energie für den als letztes hinzu kommenden Fahrgast) noch das Fassungsvermögen der beiden Fahrzeuge (hier die Anzahl der regulär vorhandenen Plätze) zu berücksichtigen. Für einen Vergleich muss also die aufgewandte Energie in geeigneter Weise normiert werden.

Dies kann dadurch geschehen, dass die

„Energie pro Fahrgast“

zum Vergleich herangezogen wird, also diejenige Energie, welche zur Unterbringung eines jeden Fahrgastes (in dem jeweiligen Fahrzeug) im Durchschnitt benötigt wird, wenn die Fahrzeuge in der genannten Weise mit Fahrgästen besetzt sind. Es ist nicht schwer, diese Betrachtungsweise auf Elektronen zu übertragen, welche auf eine Metallkugel aufgebracht werden sollen. Eine physikalische Größe, welche diese Absicht quantitativ zutreffend beschreibt, ist dann diejenige Energie, welche im Mittel erforderlich ist, um ein Elektron auf die Metallkugel zu transportieren; dabei wird von dem Endzustand ausgegangen,

wenn sich alle Elektronen auf der Metallkugel befinden. Diese normierte Größe ist dann die

„Energie pro Elektron“.

Will man sich von der Teilchenvorstellung mit Elektronen lösen, so kann man sich statt der mit einem Elektron gekoppelten elektrischen Ladung auf die Einheit der elektrischen Ladung im benutzten Maßsystem beziehen, im SI – System also auf die Einheit „1 Coulomb“. Die zu definierende neue physikalische Größe, welche dieses Phänomen beschreibt, ergibt sich dann als der Quotient aus der aufgewandten Energie und der dazugehörigen elektrischen Ladung. Die neue Größe wird als „elektrische Spannung“ bezeichnet. Es gilt:

$$\text{Elektrische Spannung} = \frac{\text{Aufgewandte Energie}}{\text{Elektrische Ladung}} .$$

Die Einheit der elektrischen Spannung im SI – System ist der Quotient aus der Einheit der Energie und der Einheit der Ladung, also 1J / 1C. Diese zusammen gesetzte Einheit wird zu Ehren des italienischen Physikers Alessandro VOLTA (1745 -1827) als

1 Volt ; abgekürzt: 1 V

bezeichnet.

Nach dieser didaktisch orientierten Betrachtung ist es angebracht einen näheren Blick auf das Werk von VOLTA zu werfen. Die überragende wissenschaftliche Leistung von Volta besteht in der Entwicklung und Konstruktion einer elektrischen Quelle, also einer Batterie (im Jahr 1800); diese besteht aus zwei unterschiedlichen Metallen (z.B. Kupfer und Zink) und einer

dazwischen befindlichen Salzlösung (z.B. Kupfersulfatlösung). Zur Verbesserung der Leistung können mehrere dieser Zellen hintereinander geschaltet werden („Volta'sche Säule“).

[403]

XVII. On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds. In a Letter from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K. B. P. R. S.

Read June 26, 1800.

A Côme en Milanois, ce zome Mars, 1800.

APRÈS un long silence, dont je ne chercherai pas à m'excuser, j'ai le plaisir de vous communiquer, Monsieur, et par votre moyen à la Société Royale, quelques resultats frappants auxquels je suis arrivé, en poursuivant mes expériences sur l'électricité excitée par le simplé contact mutuel des métaux de différente espèce, et même par celui des autres conducteurs, aussi différents entr'eux, soit liquides, soit contenant quelque humeur, à laquelle ils doivent proprement leur pouvoir conducteur. Le principal de ces resultats, et qui comprend à-peu-près tous les autres, est la construction d'un appareil qui ressemble pour les effets, c'est-à-dire, pour les commotions qu'il est capable de faire éprouver dans les bras, &c. aux bouteilles de Leyde, et mieux encore aux batteries électriques foiblement chargées, qui agiroient cependant sans cesse, ou dont la charge, après chaque explosion, se rétablirait d'elle-même; qui jouiroit, en un mot, d'une charge indéfectible, d'une action sur le fluide électrique, ou impulsion, perpétuelle; mais qui d'ailleurs en diffère essentiellement, et

Abb. 2.2.3: Die erste Seite von Voltas Schreiben an die Royal Society in London aus dem Jahr 1800 in welchem er seine Entdeckung - in französischer Sprache verfasst - vorstellt.

Mit diesem Gerät war es erstmals möglich einen (einigermaßen) konstanten Strom von Trägern elektrischer Ladungen für längere Zeit herzustellen. Durch Volta war damit die Tür aufgestoßen von der Elektrostatik zur Stromkreiselektrik, denn bis dahin musste sich die Forschung auf das Gebiet der Elektrostatik beschränken. Der Grund ist der, dass es bis zu diesem Zeitpunkt nur „Elektrisiermaschinen“ gab, also Geräte, die auf der Grundlage von Kontaktelektrizität oder Influenz elektrische Ladungen trennten, welche man dann in Kondensatoren („Leidener Flaschen“) speicherte. Konstante „elektrische Ströme“ waren mit dieser experimentellen Ausstattung nicht möglich – durch Voltas Leistung wurde ein neues Teilgebiet der Physik erschlossen.

2.3 Die Messung der elektrischen Spannung

An dieser Stelle erhebt sich die Frage, wie eine so kompliziert definierte Größe wie die Spannung gemessen werden kann. Eine einfache Antwort gibt es in diesem Fall nicht. Die Lösung des Problems ist nur möglich mit Hilfe des Begriffssystems der Physik. In diesem Gedankengebäude sind die Vorstellungen bezüglich der elektrischen Spannung eingebunden, und mit diesem System ist es möglich, einen Weg zur Beantwortung der gestellten Frage zu finden. Ein solcher Weg – basierend auf der Elektrostatik - soll hier in den grundsätzlichen Zügen dargestellt werden.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist ein geladener Kondensator, hier der Übersichtlichkeit halber ein Plattenkondensator. Um dieses Gerät „aufzuladen“ - um also dafür zu sorgen, dass sich auf beiden Platten jeweils gleich viele elektrische Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens befinden - müssen auf jede Platte viele Ladungsträger gleichen Vorzeichens aufgebracht werden. Da

sich – nach Coulomb – gleichartige Ladungsträger abstoßen, so ist dieser Ladevorgang nur zu Beginn leicht, danach wird es immer schwerer weitere Ladungsträger auf eine Kondensatorplatte zu bringen. Dies bedeutet folgendes: Um die Ladungsträger jeweils einer Ladungsart auf die Platte „hinauf zu befördern“ muss man Gewalt anwenden. Übersetzt man dies in die Sprache der Physiker so heißt dies: Um Ladungen auf die beiden Platten zu bringen ist Energie erforderlich. Somit kann dieses „Aufladen“ durch die Größen „Energie“ und „elektrische Ladung“ beschrieben werden. Dies sind genau die beiden Größen, welche – gemäß unserer vorausgegangenen Überlegungen – den Begriff der elektrischen Spannung charakterisieren.

Die nächste Frage, die sich an diese Betrachtung anschließt, lautet:

Wie kann der eben beschriebene Vorgang
experimentell realisiert werden?

Allgemein gesagt benötigt man zunächst ein Gerät, welches positive und negative Ladungen trennt und diese auf einem metallischen Leiter bereit stellt. Ein solches Gerät ist eine „Elektrisier - Maschine“, wie sie in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts in verschiedenen Varianten gebaut wurde. Das Gerät stellt an zwei metallischen Leitern – man nennt sie hier „Pole“ – die getrennten positiven und negativen Ladungen zur Verfügung. Von dort aus kann man die Ladungen entweder mit einem Konduktor oder mit einem Leitungsdraht an die Platten des Kondensators weiter führen. Nach einiger Zeit befinden sich genügend Ladungen auf den Platten, man kann die Zuleitungen abtrennen und die Maschine abschalten. An dieser Stelle ist der Hinweis wichtig, dass für das Vorhandensein einer elektrischen Spannung zwei Körper nötig sind, die elektrisch gegeneinander

isoliert sind und auf denen sich jeweils positive und negative Ladungen befinden. Im vorliegenden Fall besteht eine elektrische Spannung zwischen den Polen der in Betrieb befindlichen Elektrisier - Maschine sowie zwischen den Platten des geladenen Kondensators.

Als nächstes muss man versuchen, den vorliegenden Sachverhalt – also die Existenz einer elektrischen Spannung zwischen den geladenen Kondensatorplatten – für ein Messverfahren zu nutzen. Das Prinzip einer solchen Spannungsmessung liegt im Coulomb'schen Gesetz. Wenn sich auf den beiden Platten des Kondensators unterschiedliche Ladungsarten befinden, so muss zwischen den beiden Platten eine Anziehungskraft bestehen, welche mit der elektrischen Spannung zusammen hängt. Gelingt es, diese Anziehungskraft zu messen, so kann man daraus Rückschlüsse auf die Größe der vorliegenden Spannung ziehen. Modellmäßig kann man sich eine gleichmäßige Verteilung der Ladungsträger auf den Platten vorstellen. Eine Folge dieses Sachverhaltes ist nach Coulomb eine Anziehungskraft zwischen den Ladungsträgern, und - da diese auf den Platten fest sitzen – eine Anziehungskraft zwischen den Platten des Kondensators. Diese Anziehungskraft ist proportional zum Quadrat der Ladung (also zu Q^2 , wenn sich auf jeder Platte die elektrische Ladung vom Betrag Q befindet). Weiter ist nach einer für den Kondensator gültigen Beziehung diese Ladung Q der angelegten Spannung U proportional. Daraus folgt, dass die Anziehungskraft zwischen den beiden Platten eines geladenen Kondensators proportional zum Quadrat der angelegten Spannung ist, also proportional zu U^2 . Eine quantitative Betrachtung liefert das Ergebnis:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (A/d^2) U^2 .$$

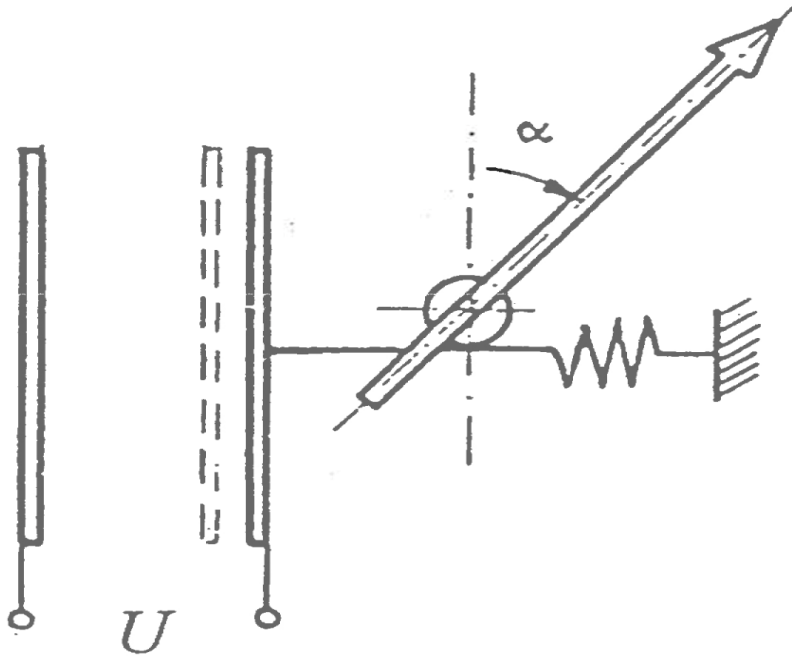


Abb.2.2.4: Zur Wirkungsweise eines elektrostatischen Spannungsmessers. Man betrachtet das Gerät als Kondensator, an welchen die zu messende Spannung angelegt wird. Aus der anziehenden Kraft zwischen den Platten ergibt sich die wirksame Spannung. Bei Geräten dieser Art ist der Zeigerausschlag dem Quadrat der angelegten Spannung proportional, es gilt $\alpha \sim U^2$.

Dabei bedeutet $|\vec{F}|$ die zwischen den Kondensatorplatten wirkende Kraft, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, A die Fläche einer Kondensatorplatte, d der Abstand zwischen den Kondensatorplatten und U die elektrische Spannung zwischen den Platten.

Auf dieser Grundlage kann ein Messgerät für die elektrische Spannung gebaut werden. Das Gerät besteht aus einem

Plattenkondensator, dessen eine Platte fixiert ist, die andere Platte ist über eine Hooke'sche Feder beweglich angebracht. In diesem Fall ist der Zeigerausschlag α proportional zum Quadrat der angelegten Spannung, es gilt

$$\alpha \sim U^2.$$

Die nebenstehende Abbildung zeigt das Prinzip eines solchen „elektrostatischen Spannungsmessgerätes“. Geräte dieser Art sind für relativ große Spannungen gut geeignet. Für kleinere Spannungen empfiehlt sich ein anderes Bauprinzip, welches auf den Grundlagen der Stromkreiselektrik beruht.

Anmerkung 1

Es soll hier noch auf eine in der Fachliteratur nicht einheitliche Bezeichnungsweise hingewiesen werden. Das in den vorausgegangenen Ausführungen beschriebene Gerät ist ein „Spannungsmessgerät“ (oder: Spannungsmesser) auf elektrostatischer Grundlage, es muss eine „elektrische Spannung“ vorliegen. Ein wesentliches Merkmal dieses Zustandes ist es, dass positive und negative Ladungen getrennt vorliegen. Allerdings wird in der Literatur ein solches Gerät auch als „Elektrometer“ bezeichnet. Diese Vokabel wird in den hier vorliegenden Ausführungen jedoch ausschließlich für ein Gerät zur Messung von elektrischen Ladungen verwendet. Zur Vermeidung von Missverständnissen sollen die Merkmale eines Gerätes zur Messung von elektrischen Ladungen und eines Gerätes zur Messung der elektrischen Spannung nochmals hervorgehoben werden.

- Im hier verwendeten Sprachgebrauch wird mit einem Elektrometer nur eine einzige Ladungsart gemessen. Man bringt positive oder negative Ladungen auf inen im Gerät fixierten

Metallstab auf, die Ladungen verteilen sich auf dem festen Stab und dem angeschlossenen beweglichen Zeiger und bewirken einen Ausschlag; dieser Zeigerausschlag ist ein Maß für die Größe der zu untersuchenden elektrischen Ladung. Wesentlich ist, dass bei einem Gerät zur Messung von elektrischen Ladungen nur eine einzige Ladungsart vorliegt und dass zwischen den einzelnen Ladungsträgern abstoßende elektrische Kräfte wirken.

- Wenn das Wort „Elektrometer“ für ein Gerät zur Messung von elektrischen Spannungen verwendet werden soll, so muss das Gerät, das ursprünglich zur Messung von elektrischen Ladungen konstruiert worden war, umgebaut werden. Das in dieser Weise konstruktiv veränderte Gerät benötigt nicht nur einen einzigen, sondern zwei nach außen gehende elektrische Anschlüsse. Diese beiden Anschlüsse werden mit den Polen einer Elektrysiermaschine verbunden. Als Folge davon wirken zwischen zwei metallischen Leitern im Inneren des Messgerätes elektrische Anziehungskräfte, aus denen dann Rückschlüsse auf die Größe der vorliegenden Spannung gezogen werden können.

Anmerkung 2

Neben der Messmöglichkeit der elektrischen Spannung auf elektrostatischer Grundlage gibt es noch ein weiteres Prinzip zur Messung dieser Größe. Dieses zweite Verfahren beruht auf der Stromkreiselektrik und benutzt die Tatsache, dass Ladungen in einem Leiter nur dann strömen, wenn an diesem Leiter eine elektrische Spannung anliegt und wenn diese Spannung durch geeignete Maßnahmen ständig aufrecht erhalten wird. Zwischen dem Strömen der Ladungsträger und der von außen wirksamen elektrischen Spannung besteht ein Zusammenhang; mit Hilfe dieses Zusammenhangs kann aus dem Ladungsträgerstrom die vorliegende elektrische Spannung bestimmt werden.

3. Strömende Ladungsträger - Von der Elektrostatik zur Stromkreiselektrik

In den vorausgegangenen Betrachtungen wurde die Elektrostatik behandelt. Die beiden grundlegenden Begriffe dieses Teilgebietes der Physik sind die elektrische Ladung und die elektrische Spannung. Diese Begriffe gründen sich ihrerseits darauf, dass Ladungsträger ruhen. Aus Gründen der sprachlichen Korrektheit sei darauf hingewiesen, dass man von Ladungsträgern sprechen sollte, da es sich um Partikel handelt, denen die physikalische Größe „elektrische Ladung“ zugeordnet werden kann. Im alltäglichen Sprachgebrauch hat es sich eingebürgert, nicht von Ladungsträgern, sondern abgekürzt nur von „Ladungen“ zu sprechen. Auch hier geschieht dies weitgehend, obwohl zu betonen ist, dass sich zwar ein materieller Ladungsträger bewegen kann, nicht dagegen ein abstrakter Begriff „Ladung“.

Nach den vorausgegangenen Betrachtungen können Ladungsträger ruhen, so wie Flüssigkeitsteilchen in einem stehenden Gewässer ruhen. Daran schließt sich die Frage an, ob sich Ladungsträger auch bewegen können, ähnlich wie sich Wasserteilchen in einem fließenden Gewässer bewegen. Eine Antwort auf diese Frage kann durch ein Experiment erfolgen, dessen Aufbau die nebenstehende Abbildung zeigt. Zum leichteren Verständnis wird der Versuch zuerst mit heute verfügbaren Geräten beschrieben, anschließend erfolgt eine zweite Betrachtung, welche die Vorgänge von dem Wissensstand aus beschreibt, der in der Zeit vor dem Jahr 1800 bestand.

Versuchsdurchführung mit heute verfügbaren Geräten

Von einem Hochspannungsgerät für Gleichspannung (bis 6000 V) führen Zuleitungen über einen Schutzwiderstand und eine Glimmlampe zu zwei isoliert aufgestellten Metallkugeln A und B; der Leiterkreis ist also unterbrochen, die Glimmlampe leuchtet nicht. Mit einer (an einem Isolierstiel befestigten) Konduktorkugel wird die Kugel A berührt, anschließend die Kugel B. Die Glimmlampe leuchtet kurz auf und zeigt damit an, dass ein

Ladungstransport von A nach B stattgefunden hat. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Überbrückt man die beiden Metallkugeln A und B durch einen Leiter, so leuchtet die Glimmlampe dauernd, woraus auf die Existenz eines kontinuierlichen Ladungsträgerstromes von A nach B geschlossen werden kann.

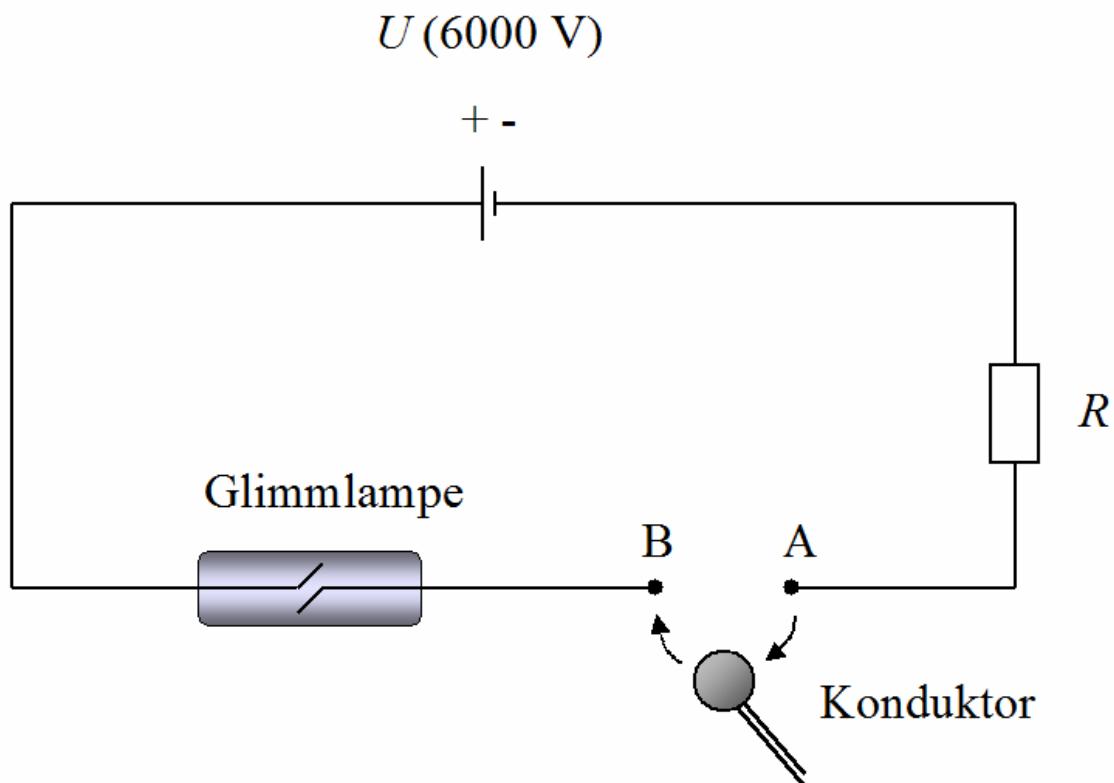


Abb. 2.3.1: Der Transport elektrischer Ladungen wird durch das Aufleuchten der Glimmlampe nachgewiesen, wenn die Konduktorkugel zuerst die Unterbrechungsstelle A des Leiterkreises und dann B berührt. Wird die Lücke überbrückt, so leuchtet die Glimmlampe ständig, es fließt ein kontinuierlicher Ladungsträgerstrom.

Voraussetzung für diesen Versuch ist ein Netzgerät, das eine gleichbleibende Hochspannung liefert und eine Glimmlampe, die als Indikator für das Auftreten eines Ladungsträgerstromes dient. Stehen diese Geräte nicht zur Verfügung, so ist der Nachweis eines Ladungsträgertransportes schwieriger, wie die nachfolgende Betrachtung zeigt.

Versuchsdurchführung mit Geräten, welche vor 1800 verfügbar waren

Als Spannungsquelle steht eine „Elektrisiermaschine“ zur Verfügung, es fehlt jedoch eine Glühlampe. Die Zuleitungen führen von der Elektrisiermaschine zu den beiden Metallkugeln A und B. Bewegt man jetzt den Konduktor von A nach B, so ist der Nachweis eines Transportes von elektrischer Ladung zunächst nur indirekt möglich, Dies geschieht folgendermaßen: Man berührt mit dem Konduktor die Kugel A und kann dann mit einem Elektroskop zeigen, dass der Konduktor dadurch geladen wurde. Weiter muss mit einem (als Pendel aufgehängtem) Holunderkügelchen durch anziehende oder abstoßende Kräfte ermittelt werden, ob der Konduktor positiv oder negativ geladen ist. Danach erfolgt die Berührung des Konduktors mit der Kugel B; dabei wird die negative Ladung abgegeben und positive Ladung aufgenommen. Auch dies ist mit der eben beschriebenen Methode nachzuweisen. Erst danach kann der Schluss gezogen werden, dass elektrische Ladung portionsweise transportiert wurde.

Um einen kontinuierlichen Ladungstransport zu demonstrieren, nähert man die beiden Kugeln A und B einander an bis ein Funkenüberschlag erfolgt. Es ist das Verdienst von Charles WHEATSTONE (1802 - 1875) mit Hilfe eines Drehspiegels gezeigt zu haben, dass tatsächlich ein Ladungsträgerstrom fließt, auch wenn die Dauer nur sehr kurz ist. Nach den Messungen von Wheatstone betrug die Dauer des Ladungsträgerstromes ungefähr 10^{-6} s. Der Grund liegt darin, dass die Elektrisiermaschinen zwar große Spannungen erzeugen können, die Anzahl der getrennten Ladungsträger ist jedoch verhältnismäßig klein, und der daraus entstehende Ladungsträgerstrom damit ebenfalls.

Das beschriebene Experiment zeigt ein Grundproblem der damaligen naturwissenschaftlichen Forschung vor dem Jahr 1800: Man konnte Ladungen trennen, man konnte sehr große Spannungen herstellen, aber es war nicht möglich, einen einigermaßen konstanten Ladungsträgerstrom über längere Zeit

herzustellen. Diese Aufgabe wurde erst im Jahr 1800 durch Alessandro Volta (1745 – 1827) und seiner Erfindung einer auf chemischer Grundlage arbeitenden elektrischen Quelle möglich.

3.1 Voltas Erfindung –

Das Tor zur Stromkreiselektrik wird geöffnet

Bevor wir uns mit Volta und seinem Werk beschäftigen, ist es zweckmäßig, einen Blick auf den Stand der Elektrik in der Zeit vor Volta zu werfen. Diese Zeit wurde bestimmt durch die Elektrostatik, deren Beginn man um 1650 datieren kann, als Otto von Guericke (1602 -1686) seine Versuche mit der geriebenen Schwefelkugel durchführte und dabei Kräfte bemerkte, die bis dahin unbekannt waren. Das unbekannte, nicht näher fassbare „Etwas“, das diese Wirkungen hervorbrachte, wurde mit dem Namen „elektrisches Fluidum“ bedacht. Man stellte weiter fest, dass dieses Fluidum mit geeigneten „Konduktoren“ transportiert werden konnte und dass es offenbar zwei verschiedene Arten von diesem „Etwas“ gab, das man dann als „Elektrizität“ bezeichnete. Im Jahr 1750 wurde dann die „Leidener Flasche“ erfunden, mit deren Hilfe man die durch Kontakt und Trennung unterschiedlicher Materialien bereit gestellte „Elektrizität“ in dieses Gefäß einfüllen und speichern konnte. Mit der Leidener Flasche – also einem Gerät, das wir heute als Kondensator bezeichnen – war es dann möglich, die Leistungsfähigkeit von Elektrisiermaschinen zu verbessern. Mit diesen Maschinen ließen sich spektakuläre Versuche durchführen. Charakteristisch für die Elektrisiermaschinen ist, dass man eine verhältnismäßig große Spannung erzeugen kann, dass die Größe der getrennten Ladungen jedoch relativ klein ist. Ein Ausgleich der an den Polen der Maschine befindlichen getrennten Ladungen kann durch einen Funkenüberschlag geschehen, ein kontinuierlicher Ladungsträgerstrom ist damit aber nicht möglich.

Es ist nicht verwunderlich, dass bei der Beschäftigung mit der Elektrisiermaschine und der großen öffentlichen Resonanz, die damit im Barock verbunden war, auch die Frage nach der

Entstehung der Elektrizität auftauchte. Eine Antwort darauf gab Luigi GALVANI (1737 – 1798), der aus seinen elektrischen Versuchen mit Froschschenkeln den Schluss zog, dass die Ursache für die Entstehung von Elektrizität im tierischen Körper zu suchen sei. VOLTA gab auf die gestellte Frage auf Grund seiner Untersuchungen eine andere Antwort. Nach seiner Auffassung entstand Elektrizität durch Kontakt zwischen Körpern aus unterschiedlichem Material. Diesen Effekt konnte er steigern, wenn er zwischen eine Kupfer-Platte und eine Zink-Platte ein Stück Pappe legte, das vorher mit einer Salzlösung getränkt worden war. Damit war das Volta-Element erfunden, in unserem heutigen Sprachgebrauch also eine elektrische Batterie. Steigern konnte Volta die Leistungsfähigkeit seines Gerätes dadurch, dass er mehrer solcher Elemente zusammen schaltete. Dazu legte er mehrere Elemente übereinander und schuf so die „Volta`sche Säule“. Volta teilte seine Erfindung im März 1800 in einem in französischer Sprache geschriebenen Brief an die Royal Society in London mit und erntete große öffentliche Resonanz. In Paris konnte er sein Gerät Napoleon Bonaparte vorführen.

Fragt man nach der Bedeutung von Voltas Erfindung, so muss man sagen, dass dadurch das Tor zur Stromkreiselektrik aufgestoßen wurde. Durch die von Volta entwickelte Batterie war es erstmals möglich, einen (einigermaßen) konstanten Ladungsträgerstrom über eine größere Zeitdauer hinweg zu erzeugen. Davor konnte man – wie bereits erwähnt – mit einer Elektrisiermaschine lediglich für kurze Zeit einen Funken herstellen. Weiter stellt sich die Frage, wie das Strömen von Elektrizität – hervorgerufen durch eine Batterie nach Volta – demonstriert werden kann. In einem Schulversuch von heute ist dies ziemlich einfach: Man schließt an die Volta`sche Zelle ein Glühlämpchen an, sein Leuchten ist für uns ein Indiz für die strömende Elektrizität. Zu Voltas Zeit gab es noch keine Glühlämpchen, der Nachweis der strömenden Elektrizität musste anders geführt werden. Volta benutzte den menschlichen Körper als Nachweisgerät. Der Experimentator befeuchtete beide Hände mit Wasser und berührte dann die zu den Polen der Säule

führenden Leitungsdrähte. Das Ergebnis war nach Volta eine „Erschütterung“, die umso heftiger ausfiel, je mehr Elemente die Säule umfasste. Eine weitere Möglichkeit bestand darin, an die Pole der Batterie zwei Leitungsdrähte anzuschließen und die freien Enden dieser Drähte in eine wässrige Salzlösung einzutauchen. An den Enden der Drähte entwickelt sich kontinuierlich Gas, was als Nachweis für die strömende Elektrizität angesehen werden kann. Diese Methode wurde noch im Jahr 1800 (also im Jahr von Voltas Erfindung) von William NICHOLSON (1753 – 1815) genannt und im gleichen Jahr durch Johann Wilhelm RITTER (1776 -1810) verfeinert.

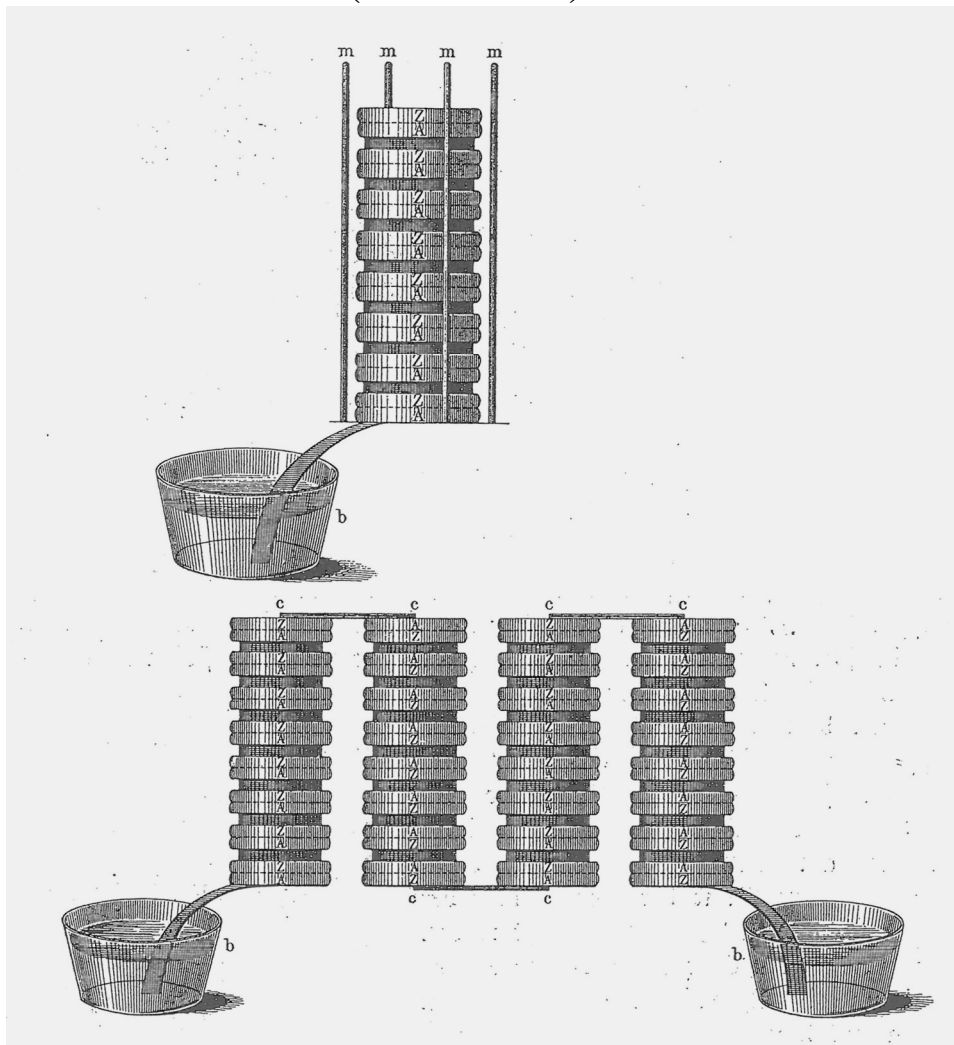


Abb. 2.3.2: Das obere Bild zeigt die erste Säule von Volta (A Silber; Z Zink). Im unteren Bild sind mehrere Säulen hinter einander geschaltet. Die unteren Platten tauchen über Metallstreifen in eine Salzlösung, bilden also die Anschlüsse der Säulen. Die Stäbe m sind aus Isoliermaterial und dienen der mechanischen Stabilität (Nach LaCour/Appel).

Ritter erfand einen Apparat, mit dessen Hilfe man Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen konnte, wenn Elektrizität (genauer: Ladungsträger) durch die Flüssigkeit strömt. Damit war ein sehr interessanter Erfahrungs- und Gedankenkreis geschlossen. Die Erfindung Voltas beruht darauf, dass chemische Prozesse elektrische Vorgänge bewirken, und umgekehrt konnte gezeigt werden, dass strömende Elektrizität chemische Vorgänge nach sich zieht. Durch die Entdeckungen von Nicholson und Ritter wurde also noch im Jahr von Voltas Erfindung die chemische Wirkung strömender Ladungsträger demonstriert.

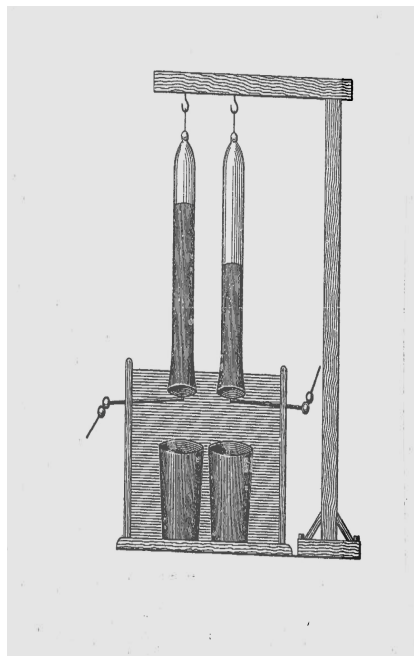


Abb. 2.3.3: Apparat von J.W. RITTER, mit dessen Hilfe man Wasser in seine chemischen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen kann. Das Gerät demonstriert die chemische Wirkung des elektrischen Stromes (Nach LaCour/Appel).

Es vergingen 20 Jahre nach Voltas Erfindung bis eine weitere wesentliche Entdeckung gemacht wurde, welche für die Entwicklung der Elektrik von großer Bedeutung war. Im Jahr 1820 entdeckte Hans Christian OERSTED (1777 - 1851), dass eine in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters befindliche Kompassnadel abgelenkt wurde. Damit war eine weitere wichtige

Eigenschaft strömender Ladungsträger entdeckt, nämlich ihre magnetische Wirkung. Diese Entdeckung wurde von anderen zeitgenössischen Wissenschaftlern rasch aufgegriffen und führte zu neuen grundlegenden Erkenntnissen. André-Marie AMPÈRE (1775 -1836) stellte bereits im Jahr 1822 Regeln für die Richtung des Magnetfeldes auf, das einen stromdurchflossenen Leiter umgibt. Ferner stellte Ampère fest, dass zwei parallele stromdurchflossene Leiter aufeinander Kräfte ausüben (und zwar je nach gleicher oder entgegen gesetzter Stromrichtung anziehende oder abstoßende Kräfte), und schließlich führte Ampère den Magnetismus von Permanentmagneten auf von ihm postulierte „Molekularströme“ im atomaren Bereich zurück. Weiter sei betont, dass die Entdeckung von Oersted die Grundlage bildet für den gesamten Elektromagnetismus - es sei nur an den Elektromagneten und seine vielen Anwendungen bis hin zum Elektromotor und an alle Geräte zur Messung der elektrischen Stromstärke auf magnetischer Basis erinnert.

Als weitere Wirkung strömender Ladungsträger sei noch die Wärmewirkung genannt. Sie kann zum Bau von Strommessgeräten genutzt werden und hat darüber hinaus eine große praktische Bedeutung, man denke nur an den Elektroherd oder ähnliche Vorrichtungen zum Heizen. Nicht unerwähnt bleiben soll in diesem Zusammenhang die Lichtwirkung, die im täglichen Leben ebenfalls von großer Bedeutung ist (von der Glühlampe bis zur Leuchtstoffröhre).

Voltas Erfindung öffnete – wie bereits erwähnt – das Tor zu einem neuen Teilgebiet der Physik, der Stromkreiselektrik. Allerdings zeigt die von Volta entwickelte „Zelle“ auch gewisse Unzulänglichkeiten. Die Spannung des Elementes war – wie spätere Versuche von Georg Simon OHM (1787 - 1854) zeigten – für Präzisionsmessungen nicht hinreichend konstant. Ferner verringert sich die Spannung nach längerem Gebrauch der Zelle. Verbesserungen des Volta'schen Elementes beruhen darauf, dass man die beiden Metallelektroden aus Cu und aus Zn nicht in eine einheitliche Salzlösung taucht, sondern dass man zwei getrennte

Salzlösungen benutzt. Man taucht die Zn-Elektrode in eine ZnSO_4 – Lösung und die Cu-Elektrode in eine CuSO_4 – Lösung. Beide Salzlösungen werden durch eine semipermeable Membran (Diaphragma) getrennt. Diese Trennwand ist nur für die Metallionen durchlässig. Mit dieser Maßnahme kann die Leistungsfähigkeit der Zelle verbessert werden. Gleichzeitig bietet das verbesserte Element die Möglichkeit, dessen Wirkungsweise – wenn auch in stark vereinfachter Form – zu deuten. Eine solche Interpretation soll hier vorgestellt werden. Taucht man einen Zn-Stab in eine verdünnte ZnSO_4 – Lösung, so geht Zn in Lösung. Atomistisch gesehen bedeutet dies, dass sich das Zn – Atom in ein zweifach positiv geladenes Ion (Zn^{2+}) und zwei freie Elektronen aufspaltet. Diese freien Elektronen sind am Zn – Stab vorhanden. Taucht man dagegen einen Cu – Stab in eine verdünnte CuSO_4 – Lösung, so schlägt sich aus der Lösung metallisches Cu an dem Stab nieder. Grundlage des Vorgangs ist der Tatbestand, dass bei chemischen Reaktionen zwischen den Reaktionspartnern ein Austausch von Elektronen stattfindet, und zwar bei einer „normalen“ chemischen Reaktion direkt zwischen den Reaktionspartnern. Ein wesentlicher Unterschied zwischen einer solchen chemischen Reaktion und den Vorgängen in einer Volta'schen Zelle besteht nun darin, dass bei einer Volta'schen Zelle der Elektronenaustausch zwischen den beteiligten Partnern - hier dem Zn und dem Cu - nicht direkt erfolgt, sondern über den außerhalb des Elektrolyten gelegenen Leiterkreis. Dies führt dazu, dass sich an der Zn - Elektrode Elektronen ansammeln, dass diese Elektronen über den äußeren Leiterkreis zur Cu – Elektrode wandern und dort aufgenommen werden. Die Folge davon ist, dass die in der CuSO_4 – Lösung befindlichen (positiven) Kupfer-Ionen entladen werden und sich dann als elektrisch neutrale Atome an der Cu – Elektrode niederschlagen. Vergleicht man die beiden Metalle Cu und Zn, so muss man feststellen, dass bei Zn das Bestreben, in Lösung zu gehen, größer ist als bei Cu. Makroskopisch gesehen bedeutet dies, dass der Zn – Stab als negativer Pol einer Batterie fungiert, der Cu – Stab als positiver Pol. Quantitative Untersuchungen bei

unterschiedlichen Metallen können diese Tendenz in eine Reihenfolge einordnen. Diese findet ihren Ausdruck in der „elektrischen Spannungsreihe“ der Metalle, die angibt, welche elektrische Spannung erzielt werden kann, wenn zwei Metalle zu einem Volta'schen Element zusammen geschaltet werden.

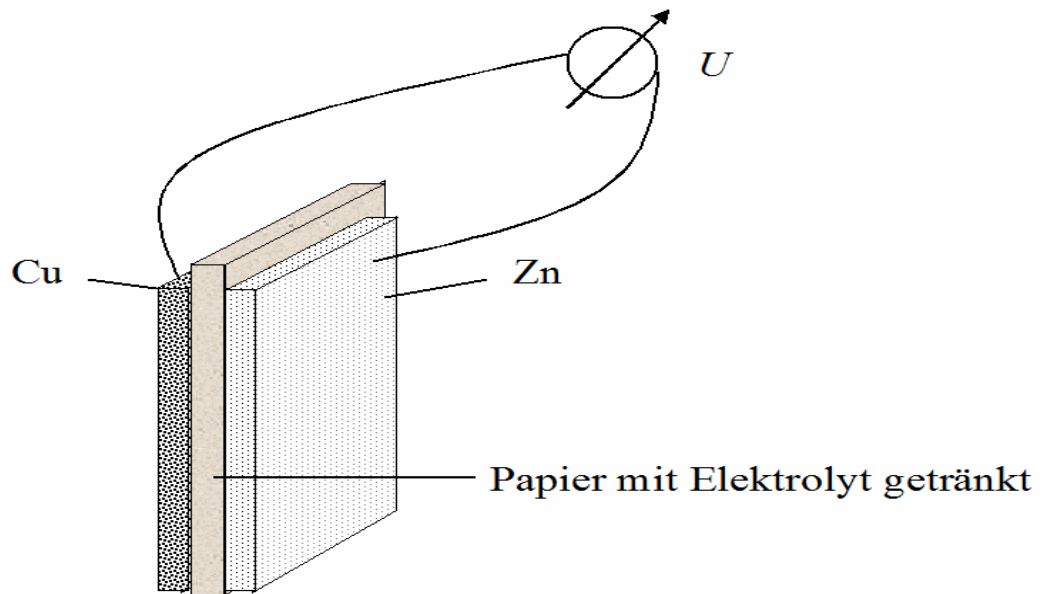


Abb. 2.3.4: Aufbau einer Volta'schen Zelle für unterrichtliche Belange. Die beiden Platten aus Cu und aus Zn stehen über ein Stück Pappe, das mit einem Elektrolyten getränkt ist, in leitender Verbindung. Durch ein Messinstrument wird die resultierende elektrische Spannung angezeigt.

Bei dem anfangs beschriebenen ursprünglichen Volta'schen Element ohne Diaphragma kann man beobachten, dass die an den Elektroden verfügbare Spannung nach einer gewissen Betriebsdauer kleiner wird. Der Grund liegt darin, dass bei Betrieb an den Elektroden nicht nur die hier geschilderten, sondern weitere chemische Prozesse stattfinden, welche die Konsistenz der Elektroden an deren Oberfläche verändern und auf diese Weise die verfügbare Spannung herabsetzen.

3.2 Der Weg zur Messung der strömenden Elektrizität -

Die elektrische Stromstärke I

Durch Voltas Erfindung wurde das Tor geöffnet zur „strömenden Elektrizität“. Damit stellte sich die Frage, wie dieses neue Phänomen gemessen werden kann. Es war André-Marie AMPÈRE (1775 – 1836), der in diesem Zusammenhang von der „Intensität“ der strömenden Elektrizität sprach und damit jene Größe meinte, die wir heute mit dem Wort „elektrische Stromstärke I “ belegen. Um zu diesem neuen Begriff hinzuführen, sollen zwei Beispiele aus dem Alltag betrachtet werden.

Beispiel 1

Auf einer sehr stark befahrenen Straße soll die Belastung durch die Fahrzeuge ermittelt werden. Dazu richtet man an einer Stelle neben der Straße einen Messplatz ein, gibt eine Zeit vor (z.B. eine Stunde) und zählt die in dieser Zeit am Messplatz vorbeifahrenden Autos. Wenn in einer Stunde 1200 Autos am Messplatz vorbeifahren, so kann man die Größe

$$\text{Autostrom} = \frac{\text{Anzahl der vorbeigefahrenen Fahrzeuge}}{\text{Dazu benötigte Zeit}}$$

als Maß für die Verkehrsbelastung festlegen. In Worten ausgedrückt kann man sagen: Der Fahrzeugstrom beträgt 1200 Fahrzeuge pro Stunde.

Beispiel 2

Man möchte feststellen, wie viel Wasser in einem großen Fluss dahinströmt. Dazu kann man am Ufer einen festen Messpunkt einrichten, wieder eine feste Zeit vorgeben und dann (mit geeigneten Hilfsmitteln) messen, welches Wasservolumen sich in dieser Zeit am Messpunkt vorbei bewegt hat. Für den Rhein bei Basel ergibt sich - bei mittlerer Wasserführung - ein Wert von

1000 m³ pro Sekunde. Man kann jetzt einen „Wasserstrom“ in folgender Weise definieren:

$$\text{Wasserstrom} = \frac{\text{Volumen des vorbei geströmten Wassers}}{\text{Dazu benötigte Zeit}} .$$

Überträgt man diese Beispiele auf den Fall der „strömenden Elektrizität“, so könnte man von einem Elektrizitäts-Strom sprechen, der in entsprechender Weise zu messen ist. Zu erfassen ist in diesem Fall die vorbeibewegte „Elektrizitätsmenge“, dann die Zeit, in der dies erfolgt, und anschließend ist der Quotient aus diesen beiden Größen zu bilden. Mit den heute gebräuchlichen Bezeichnungen heißt dies: Man misst die in einer bestimmten Zeit (Δt) durch den Leiterquerschnitt hindurch gegangene elektrische Ladung (ΔQ), bildet den Quotienten aus Ladung und Zeit und erhält dann jene Größe, die wir als „elektrische Stromstärke I “ bezeichnen. Es gilt somit die Festlegung:

$$\text{El. Stromstärke} = \frac{\text{Vorbeigeflossene el. Ladung}}{\text{Dazu benötigte Zeit}}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} .$$

Bei der Frage nach der Einheit der elektrischen Stromstärke muss man jetzt an die vorausgegangenen Betrachtungen in der Elektrostatik anknüpfen. Als Einheit der Ladung war 1 C festgelegt worden, die Einheit der elektrischen Stromstärke ist folglich 1 C s^{-1} , was zu Ehren von André-Marie AMPÈRE als 1 A bezeichnet wird. Es gilt also:

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C s}^{-1} .$$

Bei dieser Vorgehensweise ist die Einheit „1 A“ somit eine aus den Basiseinheiten „1 C“ und „1 s“ abgeleitete Einheit. Die Tatsache, dass im heute gebräuchlichen SI – System nicht „1 C“, sondern „1 A“ als Basiseinheit verwendet wird, hat seine Ursache darin, dass bei der messtechnischen Realisierung die Einheit „1 A“ sehr viel genauer gemessen werden kann als die Einheit „1 C“.

Nach diesen allgemeinen Überlegungen wollen wir jetzt zu dem praktischen Problem der Messung der elektrischen Stromstärke zurück kehren. Nach der obigen Definition muss man in irgendeiner Form die elektrische Ladung ermitteln, die in einer bestimmten Zeit am Leiterquerschnitt vorbei strömt. Mit den bisher besprochenen Methoden, insbesondere mit denjenigen der Elektrostatik, ist dies nicht möglich. Eine Lösung des Problems findet man in dem Tatbestand, dass der Ladungsdurchgang durch eine leitende Flüssigkeit (einen „Elektrolyten“) mit einem messbaren Materietransport verbunden ist. Die Leitung in Elektrolyten kommt durch Ionen (elektrisch geladene Teile von Atomen oder Molekülen) zustande; die Masse von Ionen ist erheblich größer als die Masse von Elektronen, welche die elektrische Leitung in Metallen bewirken. Ferner kommt noch ein wesentlicher Punkt hinzu. Um den Ladungsträgerstrom durch einen Elektrolyten herzustellen, taucht man die metallischen Elektroden in den Elektrolyten ein und schließt an diese Elektroden von außen eine elektrische Spannung an. Darauf hin bewegen sich die Ionen durch den Elektrolyten und werden an den Elektroden entladen. Dann folgt eine Reaktion, welche die Abscheidung eines Metalls oder eine Gasentwicklung an den Elektroden zur Folge haben kann. Dieser Sachverhalt wurde von Michael FARADAY (1791 - 1867) eingehend untersucht und 1832 in den „Faraday’schen Gesetzen“ formuliert. Die wesentlichen Inhalte lauten:

Bei Stromdurchgang durch eine Salzlösung wird am elektrisch negativen Pol (der „Katode“) das in der Lösung enthaltene Metall abgeschieden. Die Masse m des

abgeschiedenen Metalls ist proportional der durch den Elektrolyten hindurch gegangenen elektrischen Ladung Q .
Es gilt $m \sim Q$.

Dadurch ist es möglich, aus der Masse m des abgeschiedenen Metalls die Größe Q der durch den Leiter geflossenen elektrischen Ladung zu ermitteln; man benötigt dazu Kenntnisse aus der physikalischen Chemie und der Atomphysik. Insbesondere muss bekannt sein, wie groß die elektrische Ladung der beteiligten Ionen und wie groß deren Masse ist. Geht man zurück zu der von Faraday gefundenen Proportionalität und dividiert diese Beziehung durch die Zeit (Δt), so ergibt sich für die elektrische Stromstärke I :

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} ; \quad I \sim \frac{\Delta m}{\Delta t} .$$

Damit kann man folgende Definition treffen:

Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist 1 A.
Sie liegt vor, wenn bei Stromdurchgang aus einer Silbernitratlösung in 1 Sekunde die Masse von 1,118 mg Silber abgeschieden wird.

Die Messung der elektrischen Stromstärke kann auf diese Weise sehr präzise durchgeführt werden, was ein großer Vorzug des Verfahrens ist. Der Nachteil besteht darin, dass die Methode aufwändig ist. Man wird sich also nach weiteren Messverfahren umsehen müssen, die für die Praxis besser geeignet sind.

Zur grundsätzlichen Methode sei noch eine Anmerkung angefügt. Die beschriebene Definition der Einheit „1 A“ legt auch die Einheit der elektrischen Ladung fest; denn es wird ausgesagt, dass durch den Elektrolyten dann die Ladung „1 C“ hindurch gegangen ist, wenn die Masse von 1,118 mg Silber abgeschieden wurde. An dieser Stelle muss also sicher gestellt werden, dass die auf der Grundlage der strömenden Ladungsträger getroffene Definition der Einheit der elektrischen

Ladung mit derjenigen Definition kompatibel ist, die in der Elektrostatik bereits getroffen wurde. Dieser Nachweis ist sehr schwierig und kann nur im Rahmen des gesamten Gedankengebäudes und Begriffsystems der Physik geführt werden.

Die angegebene Definition der Einheit „1 A“ ist für schulische Belange nicht besonders zweckmäßig. Es empfiehlt sich in diesem Fall, als Elektrolyt verdünnte Natronlauge (NaOH) zu nehmen. Bei der Elektrolyse entsteht H_2 und O_2 , die beiden Gase, die als Knallgas bezeichnet werden, können in einem Zylinder aufgefangen und ihr Volumen direkt gemessen werden. Auf diese Weise lässt sich folgende Definition treffen:

Die elektrische Stromstärke 1 A liegt vor, wenn beim Stromdurchgang durch angesäuertes Wasser in jeder Sekunde 0,174 ml Knallgas abgeschieden werden.

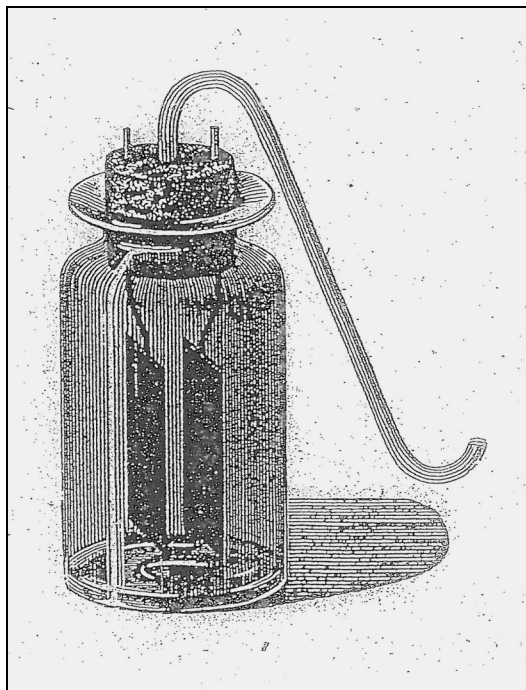


Abb. 2.3.5: Prinzipielle Möglichkeit zur Messung der elektrischen Stromstärke mit einfachen Mitteln. Die Ladungsträger fließen in einer geschlossenen Zelle durch einen Elektrolyten. Die in einer bestimmten Zeit entwickelte Knallgasmenge ist ein Maß für die Stromstärke (Nach J. Müller).

Die in der vorangegangenen Darlegung beschriebene Methode zur Messung der elektrischen Stromstärke stützt sich auf die chemische Wirkung des elektrischen Stromes. Diese Methode führt zu präzisen Ergebnissen, sie ist aber für den praktischen Gebrauch wenig geeignet. Es ist daher nicht verwunderlich, dass man schon früh nach anderen Messmethoden Ausschau hielt. Zur Messung geeignet sind grundsätzlich alle Wirkungen des elektrischen Stromes, also auch die magnetische Wirkung und die Wärmewirkung. Besonders gut eignet sich ein Effekt, dessen Wirkung proportional zur elektrischen Stromstärke I ist. Ein solcher Effekt wird im Drehspulinstrument genutzt. Bevor dieses Instrument beschrieben wird, soll ein Vorläufer, die Tangentenbussole, erwähnt werden. Dieses Messinstrument wurde 1837 von Claude POUILLET entwickelt; es besteht aus einem zu einer Spule aufgewickelten Draht und einer frei aufgehängten Magnetnadel. Nach dem Gesetz von BIOT-SAVART (1820/21) wirkt eine stromdurchflossene Spule wie ein Stabmagnet; es muss also eine Wechselwirkung zwischen einer stromdurchflossenen Spule und einem Magneten – hier der Magnetnadel – geben. Zur Durchführung der Messung werden die Windungen der Spule parallel zum magnetischen Meridian ausgerichtet. Die Spulenachse weist somit in west-östliche Richtung, während sich die Magnetnadel in nord-südlicher Richtung einstellt. Wird jetzt der Spulenstrom eingeschaltet, so überlagert sich das Spulenfeld und das Magnetfeld der Erde. Die Folge davon ist, dass sich die Magnetnadel um den Winkel α aus der Nord-Süd Richtung heraus dreht und in Richtung des Gesamtmagnetfeldes weist. Nach Biot-Savart ist das Magnetfeld der Spule dem zu messenden Strom I proportional, es folgt

$$I \sim \tan \alpha ,$$

wenn α den Ablenkungswinkel aus der Nord-Süd Richtung bedeutet. Wird der Strom durch die Spule abgeschaltet, so stellt sich die Magnetnadel wieder in Nord-Süd Richtung ein (sie geht sozusagen in die Null-Stellung zurück). Eine Eichung der

Tangentenbussole in der Einheit „Ampere“ ist mit der angegebenen Definition auf der Grundlage der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes möglich.

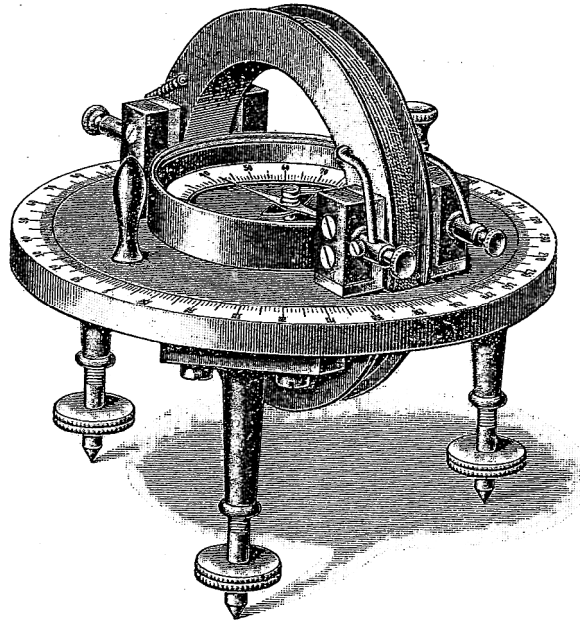


Abb. 2.3.6: Tangentenbussole von Siemens und Halske (nach M.W.Meyer).
Der zu messende Strom fließt durch die Spule, das Spulenfeld lenkt die Magnetnadel aus der Nord-Süd Richtung ab. Der Ablenkungswinkel ist ein Maß für die Stromstärke.

Die Erfindung der Tangentenbussole war für die Messtechnik ein großer Fortschritt, dennoch besitzt das Verfahren den Nachteil, dass zur Messung der Stromstärke das Magnetfeld der Erde herangezogen wird. Will man sich von dieser Einschränkung befreien, so muss man das Magnetfeld der Erde durch das Feld eines Dauermagneten ersetzen und nach einer Konstruktion suchen, bei welcher der Zeigerausschlag mit der zu messenden Stromstärke I linear zusammenhängt. Realisiert werden diese Bedingungen im Drehspulinstrument. Die zu messende Stromstärke fließt hier durch eine drehbar gelagerte Spule, die von den Polen eines Permanentmagneten umschlossen wird. Die Pole des Magneten sind so gestaltet, dass ein Radialfeld entsteht, welches in jeder Stellung der Spule auf diese ein

konstantes Drehmoment ausübt. Dieses Drehmoment ist proportional zur elektrischen Stromstärke I , man erhält also eine lineare Skaleneinteilung.

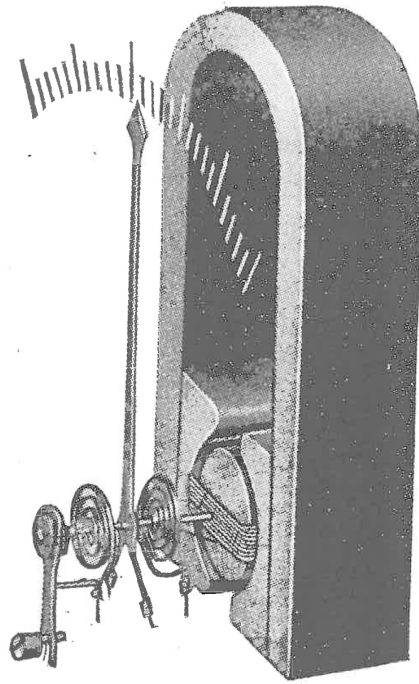
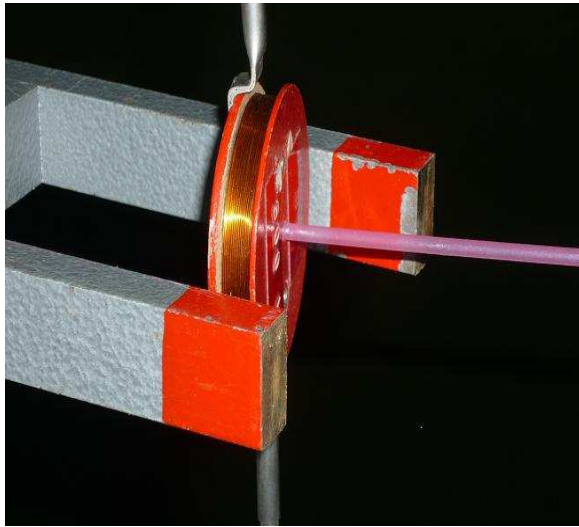


Abb. 2.3.7: Aufbau eines Drehspulinstrumentes. Links das Prinzip aus Aufbauteilen, rechts die technische Ausführung.

An dieser Stelle sei ein allgemeiner Hinweis auf den Bau derartiger Messinstrumente gestattet. Der Strom durch die Spule bewirkt im Zusammenspiel mit dem Dauermagneten ein antreibendes Drehmoment. Da man aber für jede Stromstärke einen festen Zeigerausschlag herstellen will, so muss dem antreibenden Drehmoment ein zweites Drehmoment entgegenwirken. Man erreicht dies dadurch, dass die Stromzuführungen für die Spule als Spiralfedern ausgearbeitet sind, die auf die drehbare Spule das erforderliche rücktreibende Drehmoment ausüben. Die Spiralfedern sind so gebaut, dass dieses rücktreibende Drehmoment proportional zum Drehwinkel – also zum Zeigerausschlag – ist. Auf diese Weise wird erreicht, dass für jeden Strom der Zeiger eine feste Position einnimmt.

Diese Endstellung kann der Zeiger aber nur erreichen, wenn durch eine entsprechend gewählte Dämpfung seine Bewegung möglichst rasch zur Ruhe kommt. Ganz allgemein kann man sagen, dass die drei genannten Komponenten - antreibendes Drehmoment, rücktreibendes Drehmoment und Dämpfung - die Grundbausteine eines derartigen Messinstrumentes sind.

Anmerkung zu einer Lernschwierigkeit

In der vorausgegangenen Betrachtung wurde der Begriff der elektrischen Stromstärke auf der Grundlage eines strömenden Kontinuums – vergleichbar einem Wasserstrom – entwickelt. Untersucht man die strömende elektrische Ladung in einem Metalldraht, so kann man diesen Prozess durch strömende Ladungsträger, nämlich durch Elektronen, charakterisieren. Die Elektronen bewegen sich mit einer bestimmten Driftgeschwindigkeit v . Ist die Anzahl der Elektronen pro Volumeinheit n , ihre Ladung e und der Leiterquerschnitt A , so ergibt sich für die elektrische Stromstärke I der Zusammenhang

$$I = n e A v .$$

Schüler neigen nun dazu, die Stromstärke I mit der Driftgeschwindigkeit v der Elektronen gleich zu setzen. Diese Vorstellung ist unzutreffend. Wie weiter gehende Untersuchungen zeigen, ist in einem metallischen Leiter die Anzahldichte n der Elektronen konstant, die entsprechende Modellvorstellung müsste folglich von einer inkompressiblen Elektronenflüssigkeit sprechen. Weiter ist die Ladung der Elektronen konstant, somit also auch das Produkt $(n e)$. Besteht ein unverzweigter Leiterkreis aus einem einheitlichen Material, besitzen die Leitungsdrähte jedoch unterschiedlich große Querschnitte, so ergibt sich das folgende Bild: Die Stromstärke I ist überall im Leiterkreis gleich groß. Da aber die Leiterquerschnitte – voraussetzungsgemäß - ungleich groß sind, so müssen die Driftgeschwindigkeiten der Elektronen ebenfalls unterschiedlich groß sein, und zwar sind diese Driftgeschwindigkeiten bei dünnen Drähten größer als bei

Drähten mit größerem Querschnitt – die Driftgeschwindigkeiten verhalten sich umgekehrt wie die Querschnitte der Leiter. Es zeigt sich also, dass man zwischen Stromstärke und Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger deutlich unterscheiden muss.

Anmerkung zum Sprachgebrauch

Es soll noch auf eine Lernschwierigkeit hingewiesen werden, die durch die unterschiedliche Bedeutung des Wortes „Strom“ im Alltag und im Sprachgebrauch der Physiker und der Physiklehrer besteht. Das Wort „Strom“ wird im Physikunterricht im Sinn von „Elektronenstrom“ verwendet, und man meint damit die „Stromstärke I “. Im Alltag dagegen hat das Wort „Strom“ eine völlig andere Bedeutung. Einige Beispiele sollen dies zeigen, man findet dort folgende Äußerungen:

Das E-Werk liefert „Strom“ an die Haushalte, diese bekommen dafür eine „Stromrechnung“, und diese beruht auf den vom „Stromzähler“ registrierten Messwerten. Übersetzt man diese Formulierungen in den Sprachgebrauch der Physiker und Physiklehrer, so muss man sagen:

Das Elektrizitätswerk liefert elektrische Energie an die Haushalte, diese bezahlen (gemäß der Rechnung) für die gelieferte Energie, und das in jedem Haushalt befindliche Messgerät ist ein Elektro-Energie-Zähler. Man sieht also, dass in der Alltagssprache die Vokabel „Strom“ diejenige Bedeutung hat, die im Sprachgebrauch der Physiker mit „Energie“ oder „elektrische Energie“ bezeichnet wird. Für den Physiklehrer ist es wichtig, diese durch die Sprache bedingten Lernschwierigkeiten zu kennen, um sie im Unterricht angemessen berücksichtigen zu können. Geschieht dies nicht, so spricht der Physiklehrer von „Strom“ und meint die Stromstärke I , der Schüler denkt an die Bedeutung dieses Wortes im Alltag und stellt sich darunter die elektrische Energie vor; die Folge ist ein fundamentales Missverständnis, welches für die Schüler den Zugang zum Lernstoff sehr stark behindern kann.

4. Die strömende Elektrizität wird behindert - Der Weg zum Begriff des elektrischen Widerstandes

In unserer bisherigen Betrachtung wurde am Beginn von einer „Elektrizitätsmenge“ ausgegangen, was dann zum Begriff der elektrischen Ladung führte. Die Energie, welche aufgewendet werden muss um Ladungsträger unterschiedlichen Vorzeichens zu trennen, mündete in den Begriff der elektrischen Spannung. Damit ist die Behandlung der Elektrostatik (als Teilgebiet der Elektrik) im Wesentlichen abgeschlossen. Nach Voltas Entdeckung der Batterie war der Weg frei zur „strömenden Elektrizität“ und damit zur Stromkreiselektrik. Die elektrische Stromstärke I beschreibt nach Ampère die „Intensität“ der strömenden Ladungsträger. Dadurch bekommt im Rahmen der Stromkreiselektrik der Begriff der elektrischen Spannung eine zusätzliche – über die Elektrostatik hinaus gehende – Bedeutung. Die Spannung einer „elektrischen Quelle“ sorgt dafür, dass sich Ladungsträger im Leiterkreis bewegen. Neben diesem „Antrieb“ der Ladungsträger gibt es im Leiterkreis noch ein weiteres Phänomen, nämlich eine Behinderung der Bewegung der Ladungsträger im Inneren des Leiters. Überträgt man im Rahmen einer Modellvorstellung die Bewegung der Elektronen in einem Metall auf strömende Wasserteilchen in einer Röhre, so kann man sich die Behinderung der strömenden Ladungsträger als eine Art „Reibungskraft“ vorstellen. Nach der Einschaltphase halten sich Antrieb und Behinderung das Gleichgewicht, das Kollektiv der Ladungsträger wird also im Mittel mit einer konstanten Geschwindigkeit strömen. Die Behinderung der strömenden Ladungsträger kann man mit dem Wort „elektrischer Widerstand“ beschreiben. Es ist das große Verdienst von Georg Simon OHM (1789 – 1854) begriffliche Klarheit bei den physikalischen Größen „elektrische Spannung“, „elektrische Stromstärke“ und „elektrischer Widerstand“ geschaffen zu haben. Nachfolgend wird zunächst das Werk von Ohm gewürdigt, anschließend soll der Begriff des elektrischen Widerstandes beleuchtet werden.

4.1 Das Ohm'sche Gesetz (1826)

Georg Simon OHM (1789 - 1854) stellte sich die Aufgabe, den Zusammenhang zwischen der erregenden Wirkung der elektrischen Quelle („elektrische Spannung“) und der magnetischen Wirkung des Stromes („Stromstärke“) zu untersuchen. Bei der Bewältigung dieser Aufgabe stand Ohm vor gewaltigen experimentellen und begrifflichen Schwierigkeiten. So waren die heute geläufigen Begriffe wie Spannung und Stromstärke nicht vorhanden, ebenso wenig gab es Messgeräte zur quantitativen Erfassung dieser Größen. Bei seinen ersten Versuchen verwendete Ohm als elektrische Quelle eine Voltasche Säule; diese zeigte jedoch so starke Schwankungen, dass keine reproduzierbaren Messreihen zustande kamen. Auf Rat von Johann Christian POGGENDORF (1796 – 1877) verwendete Ohm dann als Quelle ein Thermoelement - eine neue Art von elektrischer Quelle, die kurz zuvor von Thomas Johann SEEBECK (1821/25) entdeckt worden war. Ohm tauchte die eine Lötstelle in Eiswasser, die andere in siedendes Wasser und erhielt so eine konstante Spannung. Das zweite Problem von Ohm war die Messung der Stromstärke. Bekannt war damals, dass eine Magnetnadel vom elektrischen Strom abgelenkt wird, der genaue Zusammenhang zwischen Ablenkwinkel und Stromstärke war aber unbekannt. Ohm löste dieses Problem dadurch, dass er die Magnetnadel parallel zum Leiter an einem Metallband aufhängte und bei Stromfluss den Faden an der oberen Aufhängung so weit tordierte, bis die Nadel wieder in die Ausgangsstellung zurückkehrte. Da die Magnetnadel somit bei allen Stromstärken die gleiche Lage einnahm, konnte Ohm den Torsionswinkel des Aufhängefadens als proportional zur Stromstärke annehmen, womit ein relatives Maß für die Stromstärke gefunden war. Als Proben verwendete Ohm Metalldrähte, welche in zwei Näpfe mit Quecksilber eintauchten. Als Zuleitungen dienten starke Metallbänder, welche ebenfalls zu dem Quecksilber führten und so einen guten Kontakt und eine wohl definierte Länge der Proben ermöglichten.

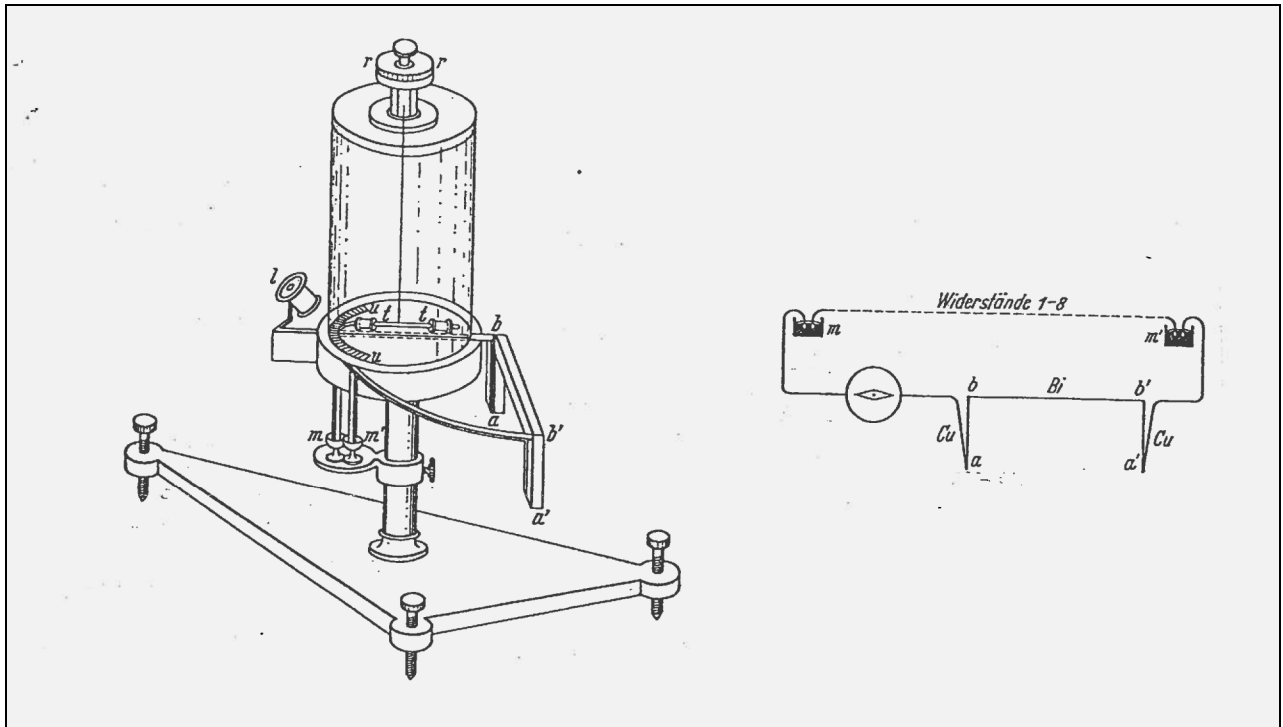


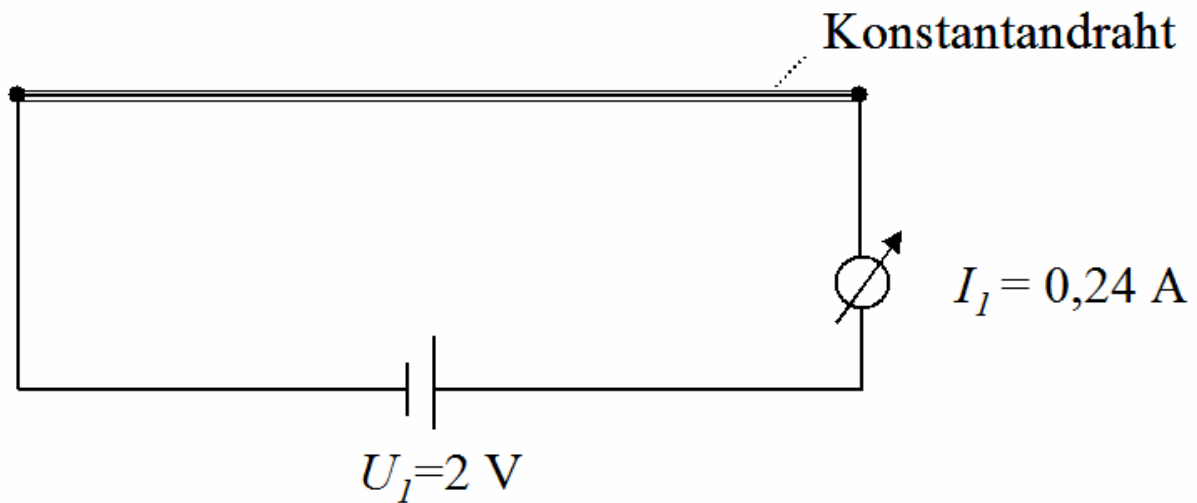
Abb. 2.4.1: Die Messapparatur von Ohm nach RAMSAUER. Für eine konstante Spannung („elektrische Erregung“) sorgte ein Thermoelement, die Messung der Stromstärke (der „magnetischen Wirkung“) erfolgte mit einer Magnethadel, welche nach ihrer Auslenkung über ein Torsionsband in die Ausgangslage zurückgedreht wurde; der Torsionswinkel war der Stromstärke direkt proportional. Auf diese Weise war ein fehlerfreier Vergleich der benutzten Stromstärken möglich. Für einen einwandfreien Kontakt zwischen elektrischer Quelle und Probe sorgten zwei mit Quecksilber gefüllte Näpfe, in welche die Zuleitungen eintauchten.

Auf Grund seiner Messungen kam Ohm zu dem Ergebnis, welches mit den heutigen Begriffen wie folgt formuliert werden kann:

$$I = U / (R_a + R_i) ,$$

wobei I die Stromstärke, U die Spannung, R_i den Innenwiderstand des Thermoelementes und R_a den Widerstand der Probe bedeuten.

Ohm'sches Gesetz bei konstanter Spannung U_1 :



Ohm'sches Gesetz bei stufenweise veränderter Spannung U_2 :

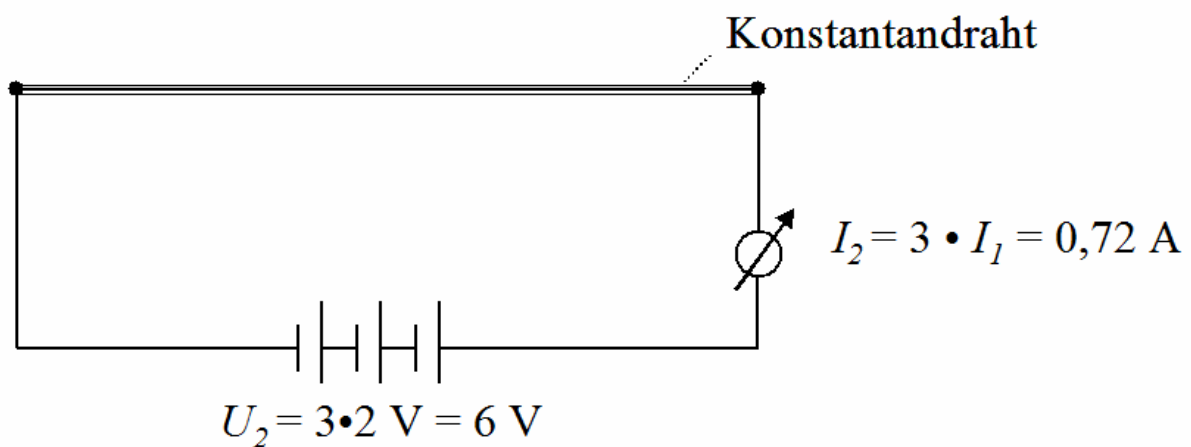


Abb. 2.4.2: Zur Veranschaulichung des Ohm'schen Gesetzes, nach dem die Stromstärke I proportional mit der angelegten Spannung U wächst. Experimentell gezeigt werden kann dieser Zusammenhang mit einem Eisendraht (Durchmesser z.B. 0,2 mm, Länge ca. 0,5 m), an welchen eine variable Spannung angelegt wird. Dies kann kontinuierlich mit einem Netzgerät geschehen oder in einzelnen Stufen, wenn mehrere Batterien (je 2 V) hintereinandergeschaltet werden. Die letztgenannte Variante kann im Unterricht auch dann angewandt werden, wenn die Messung der Spannung (mit parallel geschaltetem Messgerät) noch nicht behandelt wurde.

Um die Spannung zu variieren, führte Ohm Versuchsreihen bei unterschiedlichen Temperaturen der Lötstellen des Thermoelements aus. Weiter schaltete Ohm mehrere Thermoelemente hintereinander und erhielt bei m Elementen das Ergebnis:

$$I = m U / (R_a + m R_i) .$$

Die Leistung von Ohm besteht vor allem darin, dass er bei der Beschreibung der Vorgänge in einem elektrischen Leiterkreis begriffliche Klarheit geschaffen hat. Das von Ohm gefundene Gesetz kann für den Unterricht der Sekundarstufe I folgendermaßen formuliert werden:

Die Stromstärke in einem Leiter ist
der angelegten Spannung proportional,
wenn die Temperatur des Leiters konstant bleibt.

$$I \sim U .$$

Das Ohm'sche Gesetz beschreibt also den Zusammenhang zwischen der an einem Elektrogerät angelegten Spannung und dem durch dieses Gerät fließenden Ladungsträgerstrom unter der ganz besonderen Bedingung, dass die Temperatur des Leiters stets unverändert bleibt. Diese Bedingung ist sehr speziell und im allgemeinen Fall nicht erfüllt, wie ein Blick auf eine in Betrieb befindliche Herdplatte zeigt. Bei der Herdplatte ist es sogar erwünscht, dass die Temperatur des Leiters steigt. Hier stellt sich die Frage, wie ganz allgemein bei einem Elektrogerät der Zusammenhang zwischen der anliegenden Spannung und der bestehenden Stromstärke ist. Ein linearer Zusammenhang kann nicht erwartet werden. Bezogen auf die Bewegung der Elektronen in einem metallischen Leiter bedeutet dies, dass die Behinderung dieser Bewegung vermutlich nicht konstant ist, sondern dass diese von der Temperatur des Leiters abhängt. Somit stellt sich die Frage, wie diese „Behinderung der strömenden Ladungsträger“ begrifflich und messtechnisch erfasst werden kann. Dies soll anschließend geklärt werden.

4.2 Der Begriff des elektrischen Widerstandes

Im Folgenden wollen wir versuchen, eine Antwort auf die Frage zu finden, wie die Behinderung des Strömens der Ladungsträger in einem Elektrogerät erfasst werden kann. Dazu greifen wir auf eine bereits mehrfach benutzte Modellvorstellung zurück, nämlich auf das durch eine Röhre strömende Wasser. Damit das Wasser strömt, muss zwischen den beiden Rohrenden ein Druckunterschied bestehen; dieser bewirkt, dass ein bestimmter Wasserstrom ($\Delta V / \Delta t$) durch das Rohr strömt. Wenn jetzt die Behinderung des strömenden Wassers vergrößert werden soll, so kann dies dadurch geschehen, dass wir einen Pfropfen aus Watte in das Rohr einbringen. Bei unverändertem Druck und sonst gleichen Bedingungen wird jetzt der Wasserstrom kleiner werden, denn die Behinderung für die strömenden Wasserteilchen wurde größer. Dies kann man als eine Vergrößerung des Widerstandes für das strömende Wasser in dem Rohr auffassen. Als Ergebnis kann man festhalten, dass (bei gleichem Druck) eine Vergrößerung des Widerstandes eine Abnahme des Wasserstromes zur Folge hat.

Entsprechende Überlegungen kann man für den elektrischen Fall anstellen. Man denkt sich das Wasser durch eine „Elektronenflüssigkeit“ ersetzt, an die Stelle der Wasserteilchen treten Elektronen. Die Rechtfertigung für die Betrachtung der Elektronen als inkompressible Flüssigkeit erfolgt in diesem Fall aus weiter gehenden Überlegungen der Festkörperphysik. Im Wassermodell ist der Druckunterschied für das Strömen der Wasserteilchen verantwortlich, beim Strömen der Elektronen ist diese Ursache die anliegende elektrische Spannung. Sucht man jetzt nach einer zweckmäßigen Beschreibung des elektrischen Widerstandes vom Leiter (allgemeiner: des angeschlossenen Elektrogerätes), so kann man sagen: Je größer der elektrische Widerstand ist, desto kleiner ist die Stromstärke I . Andererseits ist nach der experimentellen Erfahrung die Stromstärke I umso größer, je größer die angelegte Spannung U ist. Eine zweckmäßige Definition des elektrischen

Widerstandes wird dies benutzen und zu dem Ergebnis kommen, dass der elektrische Widerstand der angelegten Spannung direkt und dem Ladungsträgerstrom umgekehrt proportional ist. Da es sich um eine Definition handelt, so kann die Proportionalitätskonstante gleich eins gesetzt werden, und man erhält dann folgendes Ergebnis:

$$\begin{aligned} \text{Elektrischer Widerstand} &= \frac{\text{Angelegte Spannung}}{\text{El. Stromstärke}} . \\ R &= U / I . \end{aligned}$$

Dies ist - wie bereits bemerkt - eine Messvorschrift (kein Gesetz, auch nicht das Ohm'sche Gesetz), mit deren Hilfe bei einer bestimmten Spannung und dem dabei fließenden Ladungsträgerstrom der Widerstand bestimmt werden kann - und zwar bei dieser bestimmten Stromstärke. Bei einer anderen Stromstärke ergibt sich in der Regel ein anderer Wert für den Widerstand (bei vielen Geräten nimmt er mit wachsender Stromstärke zu). Ein möglicher Grund für das Missverständnis zwischen Ohm'schen Gesetz und Definition des elektrischen Widerstandes mag seine Ursache darin haben, dass die im Alltag verwendeten Elektrogeräte nur mit einer ganz bestimmten Spannung - der Netzspannung - betrieben werden und dass deshalb die Abhängigkeit des Widerstandes von der angelegten Spannung (bzw. von der dabei vorhandenen Stromstärke) nicht in Betracht gezogen werden muss.

Im SI – System hat man für die Einheit des elektrischen Widerstandes die Bezeichnung

$$1 \text{ Ohm} = 1 \, \Omega ; \quad 1 \, \Omega = 1 \text{ V A}^{-1}$$

gewählt. Dies bedeutet, dass der Widerstand eines Elektrogerätes dann $1\ \Omega$ beträgt, wenn bei der anliegenden Spannung $1\ \text{V}$ der elektrische Strom $1\ \text{A}$ fließt. Veranschaulichen kann sich ein Schüler die Größe eines gegebenen Widerstandes (z.B. $1000\ \Omega$) dadurch, dass man folgende Frage stellt: Welche Spannung muss man an das Elektrogerät anlegen, damit bei dem gegebenen Widerstand ein Strom von $1\ \text{A}$ fließt? Die Antwort lautet: Bei einem Widerstand von $1000\ \Omega$ muss an das Gerät eine Spannung von $1000\ \text{V}$ angelegt werden. Die Maßzahl dieser Spannung ist gleich der Maßzahl des Widerstandes (gemessen in Ω).

Eine weitere Anschauungshilfe mag ein Blick auf die historische Entwicklung geben. Da die Erarbeitung klarer Begriffe in der Elektrizität äußerst schwierig ist, so verlief die Entwicklung nicht immer kontinuierlich. So wurde die Einheit des elektrischen Widerstandes zeitweise durch ein „Normal“ (vergleichbar dem Exemplar des Urmeters in Sèvres bei Paris) definiert. Unter diesem Normal verstand man einen Körper, der bei Stromdurchgang genau den Widerstand von $1\ \Omega$ haben sollte. Die entsprechende Definition lautete:

1 Ohm ($1\ \Omega$) ist der Widerstand, den eine
Quecksilbersäule von $106,4\ \text{cm}$ Länge
und $1\ \text{mm}^2$ Querschnitt
dem Durchgang des elektrischen Stromes bietet.

Diese Definition ist durch die oben genannte heutige Festlegung überholt, sie kann aber zur Veranschaulichung des Widerstandes $1\ \Omega$ beitragen.

Abschließend soll nochmals betont werden, dass der Widerstand eines Elektrogerätes im Allgemeinen nicht konstant ist. Man legt an das Gerät eine variable Spannung an und misst für jeden Wert U der Spannung die dazugehörige Stromstärke I . Anschließend bildet man für jedes Wertepaar den Quotienten U/I und kann den Widerstand R als Funktion von U (oder von I) darstellen. Im Allgemeinen erhält man eine komplizierte Kurve.

5. Elektronenstrom und Energiestrom - Ungleiche Zwillinge

Der Begriff des „Elektronenstromes“ wurde bereits in einem vorausgegangenen Abschnitt behandelt. In allgemeiner Formulierung handelt es sich um einen Ladungsträgerstrom. Im Hinblick auf den Unterricht in der Sekundarstufe I kann man jedoch von einem Elektronenstrom sprechen, da in dieser Schulstufe vorzugsweise die Elektrizitätsleitung in Metallen behandelt wird, und in diesem Fall sind die Ladungsträger Elektronen. Die Elektrizitätsleitung in Gasen und Flüssigkeiten, die auf der Wanderung von Ionen beruht, sowie der Ladungstransport in Halbleitern können hier in den Hintergrund treten. Gemessen wird der Ladungsträgerstrom in der Maßeinheit 1 A. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass an dieser Stelle für den Schüler eine durch die Sprache bedingte Lernschwierigkeit besteht, denn das Wort „Strom“ wird in sehr unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Im Sprachgebrauch der Physiker wird „Strom“ als Abkürzung für „elektrische Stromstärke I “ (Maßeinheit: 1 A) verwendet. In der Alltagssprache und im Sprachgebrauch der Elektrizitätswirtschaft bedeutet „Strom“ meistens so viel wie „elektrische Energie“. Um Missverständnisse bei den Schülern zu vermeiden, sollte man im Physikunterricht daher die abgekürzte Formulierung „Strom“ vermeiden und stattdessen vom „Elektronenstrom“ oder vom „Energiestrom“ sprechen. Unter „Energiestrom“ ist dabei der Quotient aus der an einer bestimmten Stelle vorbei geströmten elektrischen Energie und der dazu benötigten Zeit zu verstehen. Die Maßeinheit für den Energiestrom ist somit

$$1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ Watt (1 W) .}$$

Auf die beiden Größen „Elektronenstrom“ und „Energiestrom“ soll jetzt näher eingegangen werden.

Elektronenstrom

Auf Grund der vorausgegangenen Betrachtungen kann der „Elektronenstrom“ als Ladungsträgerstrom angesehen werden. Seine Definition und seine Messung wurden im Abschnitt über strömende Elektrizität besprochen. Ergänzend ist anzufügen, dass man zur experimentellen Realisierung eines Elektronenstromes mehrere Geräte benötigt, und zwar:

- eine elektrische Quelle, also eine Batterie, einen Akku oder einen Generator
- ein Elektrogerät, im einfachen Fall ein Glühlämpchen
- elektrische Kabel, welche die elektrische Quelle mit dem Elektrogerät verbinden.

Der Elektronenstrom kann mit einem geeigneten Messgerät direkt bestimmt werden. Nach den bisherigen Überlegungen treten die Elektronen am negativen Pol der Batterie aus, bewegen sich durch das Experimentierkabel zum Lämpchen, durchströmen das Lämpchen und gelangen durch das zweite Kabel zum positiven Pol der Batterie. Hervor zu heben ist, dass an dieser Stelle der Elektronenstrom nicht zum Stillstand kommt, sondern dass sich die Elektronen im Inneren der Batterie weiter bewegen, und zwar hier vom positiven zum negativen Pol. Die Aufgabe der Batterie besteht also – vereinfacht ausgedrückt – darin, den Elektronenstrom aufrecht zu erhalten, Bildlich gesprochen vollführt der Elektronenstrom einen **Kreislauf**. Weiter kann durch Messungen festgestellt werden, dass in einem unverzweigten Leiterkreis der Elektronenstrom überall gleich groß ist. Dies trifft auch dann zu, wenn in dem Leiterkreis mehrere Geräte „in Reihe“ (also hinter einander) geschaltet sind. In einem verzweigten Leiterkreis gelten die Kirchhoffschen Gesetze (Knotenregel und Maschenregel). Diese besagen im Wesentlichen, dass bei einer Verzweigung des Leiterkreises (Parallelschaltung) der ankommende Elektronenstrom sich in mehrere Teil-Elektronenströme aufgliedert, und zwar in der Weise, dass die Summe der Teil-Elektronenströme den gesamten Elektronenstrom ergibt. Die Betrachtung des Elektronenstromes im geschlossenen Leiterkreis ist ein sehr wichtiger

Erkenntnissschritt, er sagt aber nichts über einen zweiten, sehr wichtigen Aspekt aus. Dieser Punkt wird deutlich, wenn wir das Glühlämpchen durch einen Elektromotor ersetzen und diesen in Betrieb nehmen. Der Elektromotor kann mechanische Energie nach außen abgeben, und diese Energie kann nur von der elektrischen Quelle stammen. Wir müssen also neben dem Kreislauf der Elektronen noch das Strömen von Energie **nur in einer einzigen Richtung** betrachten.

Energiestrom

Zur näheren Untersuchung des angesprochenen Strömens von elektrischer Energie wollen wir uns von einer im Haushalt befindlichen Steckdose zum nächsten Elektrizitätswerk begeben. Als Beispiel soll ein „Kohlekraftwerk“ gewählt werden. In einem solchen Werk wird kontinuierlich Steinkohle verfeuert, in einem großen Werk ungefähr 10.000 t Steinkohle innerhalb von 24 Stunden (also 100 kg in jeder Sekunde). Durch die beim Verbrennen entstehende Wärme wird Wasserdampf erhitzt und auf hohen Druck gebracht. Der Wasserdampf treibt eine Turbine und diese einen Generator. Am Ausgang des Generators steht elektrische Energie zur Verfügung. Betrachtet man das Ganze von einem anderen Gesichtspunkt aus, so haben wir es bei einem „Elektrizitätswerk“ mit einer Umwandlungskette von Energie zu tun. Bei Steinkohle liegt die Energie in chemisch gebundener Form vor, durch den Verbrennungsvorgang wird diese Energie frei gesetzt und steht dann als thermische Energie im Wasserdampf zur Verfügung. In der Turbine wird die thermische Energie in mechanische Energie umgewandelt, die Turbine treibt den Generator, und dies bedeutet eine Umwandlung der mechanischen Energie in elektrische Energie (wie dies in kleinem Maßstab auch bei einem Fahrraddynamo geschieht). Diese bereitgestellte elektrische Energie muss nun vom Elektrizitätswerk zum Abnehmer transportiert werden. An dieser Stelle soll im Sinne des Energiesatzes nicht von „Erzeuger“ und „Verbraucher“ gesprochen werden, da Energie weder aus dem Nichts heraus erzeugt noch vernichtet werden kann. Als neutrale

Bezeichnungen werden die Formulierungen „Energie-Lieferant“ und „Abnehmer“ vorgeschlagen.

Nach dieser Vorbetrachtung ergeben sich folgende Fragen:

- Wie kann man erreichen, dass die elektrische Energie vom Elektrizitätswerk zur Steckdose des Abnehmers gelangt?
- Wie kann man den erwähnten „Energiestrom“ quantitativ erfassen?
- Wie kann man sich die Entstehung eines elektrischen Energiestromes vorstellen?

Zur Beantwortung der Fragen wollen wir einen Blick auf unsere einfache experimentelle Anordnung – bestehend aus Batterie, zwei Kabeln und einem Glühlämpchen – werfen. Beim Elektronenstrom hatten wir festgestellt, dass es sich um einen Kreislauf der Elektronen handelt. Beim Energiestrom ist die Sachlage völlig anders. Wir haben einen „Energie-Lieferanten“, die Batterie, und einen Abnehmer für die gelieferte Energie, das Glühlämpchen. Beide sind miteinander durch zwei Leitungsdrähte verbunden, und als Ergebnis können wir feststellen:

In dieser Anordnung strömt elektrische Energie von der Batterie zum angeschlossenen Glühlämpchen. Dieser elektrische Energiestrom bewegt sich nicht im Kreis wie der Elektronenstrom, sondern er fließt nur in einer einzigen Richtung (wie in einer Einbahnstraße), nämlich von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät. Erforderlich sind dazu lediglich die beiden Leitungsdrähte.

An dieser Stelle können wir also unsere erste Frage beantworten: Wir benötigen zwei Leitungsdrähte, die von den beiden Polen der elektrischen Quelle zu den zwei Anschlüssen des Elektrogerätes führen, damit Energie von der elektrischen Quelle zum Elektrogerät strömen kann.

Das Ergebnis unseres Laborexperimentes können wir auf den großtechnischen Bereich übertragen. Wir wollen erreichen, dass die Energie vom Elektrizitätswerk zu den Abnehmern strömen kann, und dazu müssen zwei Kabel aus elektrisch gut leitendem Material vom Elektrizitätswerk zu den Wohnungen der Abnehmer gebaut werden. In der Praxis sind dies gewaltige Anlagen („Hochspannungsleitungen“). In ihnen fließen riesige Energieströme, vergleichbar dem in gewaltigen Rohrleitungen fließenden Öl oder Gas. Zwischen dem strömenden Öl in einer Pipeline und der strömenden elektrischen Energie in einer Hochspannungsleitung besteht aber ein gewaltiger Unterschied. Beim Öl bewegen sich große Mengen von Materie, was einen erheblichen technischen Aufwand – beispielsweise an Pumpen – erfordert; beim Strömen der elektrischen Energie scheint sich in den Kabeln überhaupt nichts zu bewegen. Dies ist eine höchst bemerkenswerte Eigenart des elektrischen Energiestromes.

Quantitative Erfassung des Energiestromes

Zur messtechnischen Erfassung des elektrischen Energiestromes können wir uns ein idealisiertes Laborexperiment vorstellen. An unsere elektrische Quelle schließen wir über zwei Kabel einen Elektromotor an. Damit strömt elektrische Energie von der Quelle zum Motor; der Motor soll diese zugeführte elektrische Energie verlustfrei in mechanische Energie umwandeln und dabei einen Körper im Schwerfeld der Erde hochheben. Beträgt die Gewichtskraft des Körpers an der Erdoberfläche 1 N und hebt der Motor diesen Körper in 1 s um 1 m hoch, so beträgt der vom Motor abgegebene mechanische Energiestrom 1 J s^{-1} , also 1 Watt. Dieses Messverfahren zur Ermittlung des elektrischen Energiestromes ist prinzipiell möglich, jedoch nicht sehr praktikabel. Viel angenehmer wäre eine Methode, welche es gestattet, den elektrischen Energiestrom aus elektrischen Daten zu berechnen. Diese Aufgabe erscheint zunächst sehr schwierig, sie ist jedoch mit den in der Sekundarstufe I vorhandenen Möglichkeiten zu bewältigen.

Zur Lösung führen wir die folgenden Laborexperimente durch. Zunächst schließen wir unser Lämpchen an die Batterie an; bei intakter Batterie leuchtet das Lämpchen „normal“ hell. Dies bedeutet, dass ein ganz bestimmter Energiestrom von der Batterie zum Lämpchen fließt. Jetzt wollen wir den dreifachen Energiestrom im Experiment realisieren. Dazu nehmen wir drei gleiche Glühlämpchen und schalten sie „hintereinander“ an unsere Batterie. Die Lämpchen leuchten nur ganz schwach, der Energiestrom ist also keinesfalls dreimal so groß wie bei einem einzigen Lämpchen. Der dreifache Energiestrom liegt erst dann vor, wenn jedes der drei Lämpchen so hell leuchtet wie das eine Lämpchen im ersten Versuch. Dieses Ziel können wir erreichen, wenn wir zum Betrieb der drei Lämpchen nicht eine einzige Batterie nehmen, sondern drei Batterien, die wir „hintereinander“ (in Reihe) zusammen schalten. Bei dieser Schaltungsweise der Batterien können wir davon ausgehen, dass in dem Leiterkreis jetzt eine Spannung existiert, die dreimal so groß ist wie beim Betrieb von einem einzigen Lämpchen. Der Versuch zeigt, dass bei dieser Anordnung alle drei Lämpchen „normal“ hell leuchten. Dies berechtigt zu dem Schluss, dass von der elektrischen Quelle (bestehend aus drei gleichen Batterien) der dreifache Energiestrom ausgeht. Wir erhalten das

Ergebnis 1: In einem Leiterkreis ist der elektrische Energiestrom proportional der angelegten Spannung U , es gilt

$$(\Delta W / \Delta t) \sim U .$$

Um weitere Einflussgrößen auf den elektrischen Energiestrom zu untersuchen, schließen wir jetzt die drei Glühlämpchen in anderer Weise an die elektrische Quelle an. Wir nehmen eine (hinreichend leistungsfähige) Batterie und verbinden die Anschlüsse eines jeden Lämpchens mit den beiden Polen der Batterie („Parallelschaltung“). An jedem Lämpchen liegt jetzt die Spannung der Batterie, und bei geeigneter Dimensionierung leuchten jetzt alle drei Lämpchen normal hell. In jedem Lämpchen fließt ein bestimmter Elektronenstrom; insgesamt fließt – bei dieser Schaltungsart – ein Elektronenstrom, der dreimal so groß

ist wie beim Betrieb von einem einzigen Lämpchen. Dies kann begründet vermutet werden, und diese Vermutung lässt sich darüber hinaus durch Messung der beteiligten Elektronenströme experimentell bestätigen. Damit ist deutlich, dass beim ordnungsgemäßen Betrieb von drei Lämpchen der von der Batterie abgegebene Energiestrom dreimal so groß ist wie beim Betrieb von einem einzigen Lämpchen. Wir erhalten das

Ergebnis 2: In einem Leiterkreis ist der elektrische Energiestrom der elektrischen Stromstärke I proportional, es gilt

$$(\Delta W / \Delta t) \sim I.$$

Fasst man die beiden Ergebnisse zu einer einzigen Aussage zusammen, so ergibt sich das

Ergebnis 3: In einem Leiterkreis ist der elektrische Energiestrom dem Produkt aus der angelegten Spannung U und der vorhandenen Stromstärke I proportional, es gilt

$$(\Delta W / \Delta t) \sim U I.$$

Jetzt stellt sich die Frage nach dem Proportionalitätsfaktor. Zur Auffindung der Antwort kann eine Dimensionsbetrachtung helfen. Die Einheit der Spannung ist 1 V, was durch 1 J C^{-1} ausgedrückt werden kann. Die Einheit der Stromstärke ist 1 A, anders formuliert 1 C s^{-1} . Das Produkt beider Einheiten liefert die Einheit 1 J s^{-1} . Wir können also an dieser Stelle – im Rahmen unserer schulischen Möglichkeiten – vermuten, dass man in unserem Ergebnis den Proportionalitätsfaktor gleich 1 setzen kann und erhalten damit das

Ergebnis 4: In einem Leiterkreis kann der elektrische Energiestrom als Produkt aus der angelegten Spannung U und der Stromstärke I berechnet werden, es gilt

$$(\Delta W / \Delta t) = U I.$$

Die Einheit des Energiestroms im SI-Systems ist 1 J s^{-1} (= 1 Watt).

Will man den Energiestrom messen, der in ein Elektrogerät hineinfließt, so muss man folgendermaßen vorgehen: Man misst die am Gerät anliegende Spannung U und die durch das Gerät fließende Stromstärke I . Dann bildet man das Produkt $U I$ und erhält den in das Gerät hinein fließenden Energiestrom.

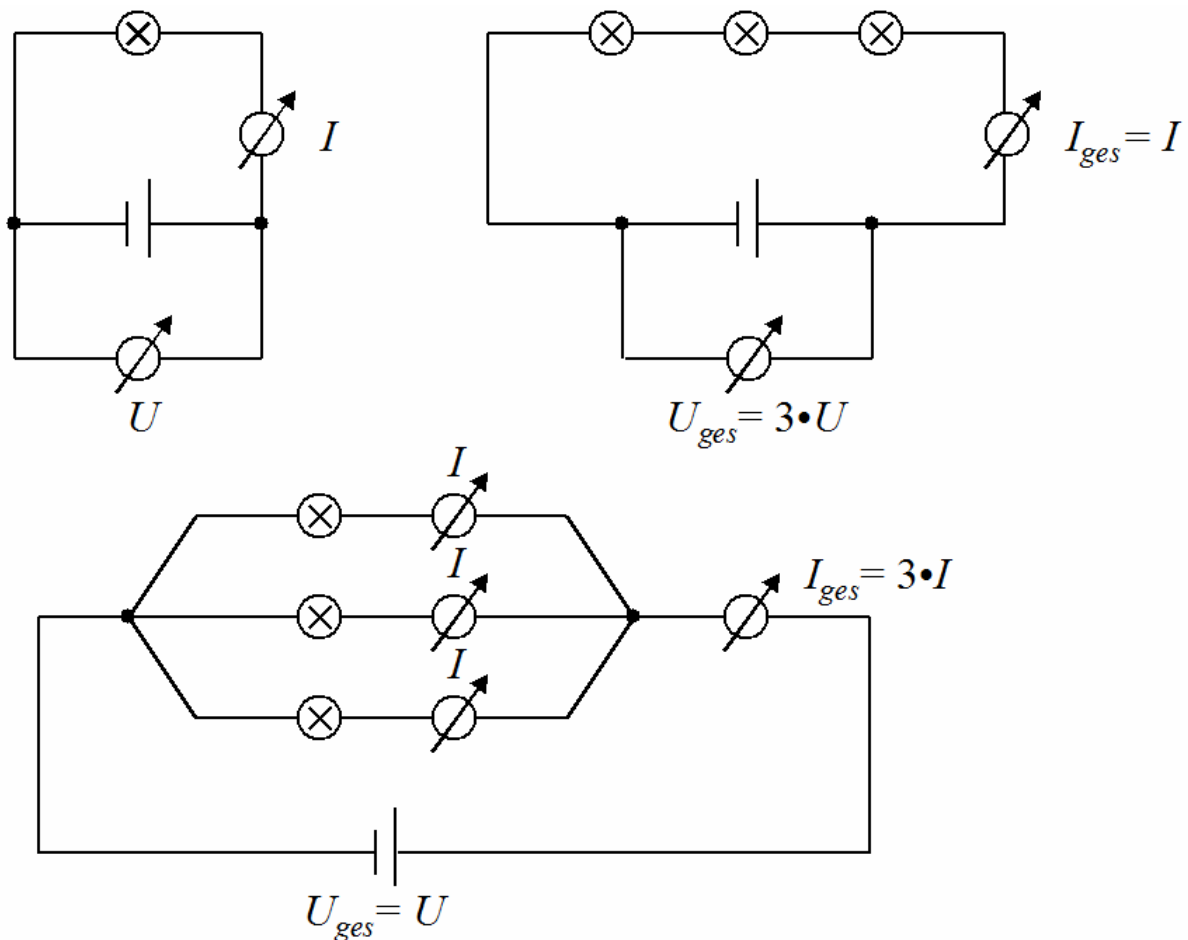


Abb. 2.5.1: Zur quantitativen Erfassung des elektrischen Energiestromes, der von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät fließt. Werden drei Glühlämpchen hintereinander geschaltet, so benötigt man für deren Betrieb eine dreimal so große Spannung wie für den Betrieb von einem einzigen Lämpchen. Bei Parallelschaltung von drei Lämpchen genügt zum Betrieb eine Batterie gleicher Spannung (wie bei einem einzigen Lämpchen), die Gesamtstromstärke ist jedoch dreimal so groß wie beim Betrieb von einem einzigen Glühlämpchen. Als Ergebnis folgt, dass der elektrische Energiestrom dem Produkt aus der angelegten Spannung U und der Stromstärke I proportional ist.

Die vorausgegangenen Überlegungen zur Ermittlung des Energiestromes verdienen noch eine kurze Nachbetrachtung. Der vorgestellte Gedankengang führt zu dem gewünschten quantitativen Ergebnis, dieses ist rational verständlich. Für den Schüler bleibt aber - wie fast in der gesamten Elektrizitätslehre - ein empfindungsmäßiger Zugang verschlossen.

Dieses Defizit kann - mindestens teilweise - dadurch behoben werden, dass man die eben beschriebenen Versuche wiederholt, dieses Mal aber als elektrische Quelle nicht eine Batterie, sondern einen handgetriebenen Generator benutzt. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, den Schülern ein unmittelbares Gefühl für den vom Generator weg fließenden Energiestrom zu vermitteln. Zunächst wird ein einziges Glühlämpchen an den Generator angeschlossen; damit das Lämpchen ordnungsgemäß leuchtet, muss die Kurbel am Generator mit einer bestimmten Drehzahl und mit einer bestimmten Kraft in Bewegung gehalten werden.

Schließt man drei Lämpchen in Reihe an den Generator an, so muss man an der Kurbel wesentlich schneller drehen um die erforderliche größere Spannung zu erhalten - die Umfangsgeschwindigkeit der Kurbel ist jetzt viel größer als beim Betrieb von einem einzigen Lämpchen.

Werden dann drei Lämpchen parallel zum Generator angeschlossen, so muss man die Kurbel „genau so schnell“ drehen wie bei einem einzigen angeschlossenen Lämpchen (die Spannung ist in diesem Fall gleich groß), allerdings benötigt man zum Drehen der Kurbel eine deutlich größere Kraft als beim Betrieb von einem einzigen Lämpchen. Liegen bei den Schülern Kenntnisse aus der Mechanik vor, mit deren Hilfe man den mechanischen Energiestrom (also die mechanische Leistung) berechnen kann, so kann man auf die folgende quantitative Beziehung zurück greifen (wenn die Vektoren \vec{F} und \vec{v} parallel sind):

$$(\Delta W / \Delta t) = |\vec{F}| \cdot (|\Delta \vec{s}| / \Delta t)$$

$$(\Delta W / \Delta t) = |\vec{F}| \cdot |\vec{v}|$$

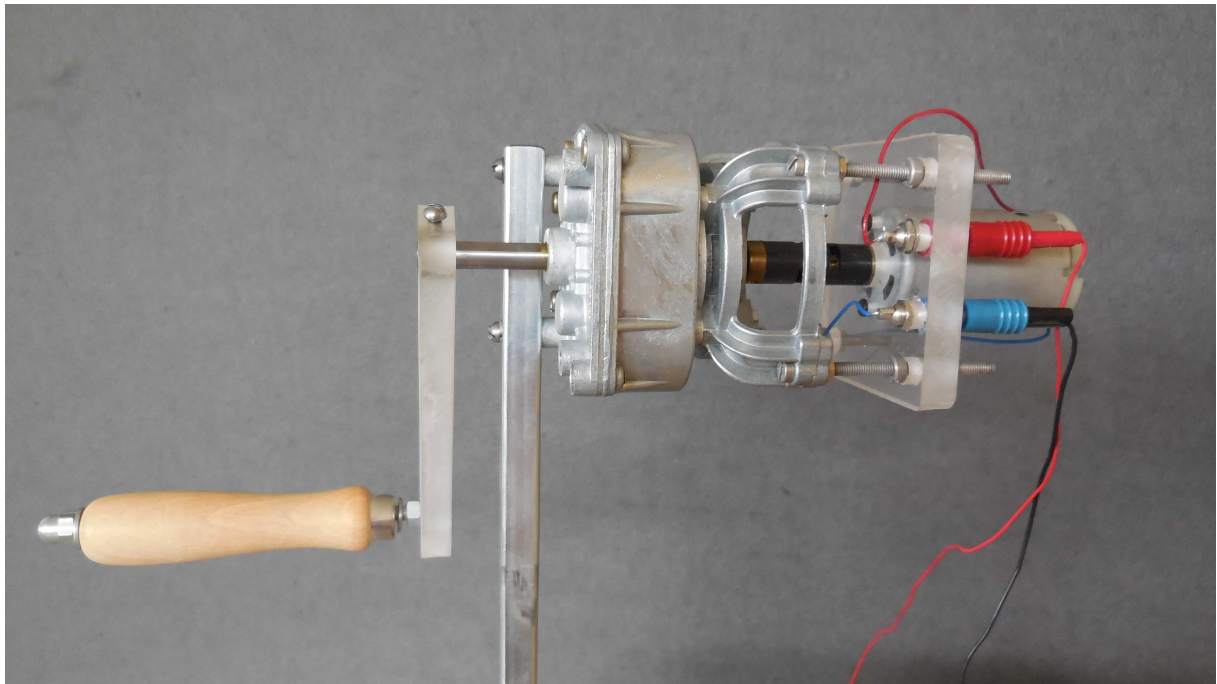


Abb. 2.5.2: Handgetriebener Generator zur Demonstration des elektrischen Energiestromes von der Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät.

Die Beziehung bedeutet, dass die mechanische Leistung proportional ist der wirkenden Kraft \vec{F} und der Geschwindigkeit \vec{v} , mit welcher der betreffende Körper bewegt wird. Es ergibt sich der „mechanische Energiestrom“ in J s^{-1} , wenn die Kraft in N und die Geschwindigkeit in m s^{-1} gemessen werden. Das Ziel des Versuches liegt nicht in einer quantitativen Herleitung der gewünschten Gleichung. Vielmehr soll gezeigt werden, dass – bei den beschriebenen Versuchen – die vom Experimentator ausgehenden und zum Generator führenden mechanischen Energieströme durch mehrere Faktoren unterschiedlicher Größe bestimmt werden. Diese Erfahrung, die ein Schüler beim Betreiben des Generators macht, ist sehr wichtig; sie vermittelt einen direkten gefühlsmäßigen Bezug zu den jeweiligen Energieströmen und damit eine Erfahrung, die bei Verwendung einer Batterie dem Menschen vollständig verschlossen bleibt.

Anmerkung

Eine strenge Analyse muss bei der Bewegung der Kurbel eine Rotation betrachten, das Ergebnis lautet dann

$$(\Delta W / \Delta t) = |\vec{M}| \cdot |\vec{\omega}| .$$

Das Ergebnis setzt sich aus dem an der Kurbel angreifenden Drehmoment \vec{M} und der betreffenden Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ zusammen. Da bei den hier in Betracht gezogenen Unterrichtsgängen die Rotation meist nicht behandelt wird, so wird ersatzweise eine Translation untersucht.

Deutung des Energiestromes

Schließlich stellt sich die Frage nach der Deutung des Energiestromes von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät. Eine streng fachwissenschaftliche Erklärung ist mit Hilfe des Begriffs der elektrischen Feldstärke möglich. Weiter benötigt man eine Untersuchung der Verteilung der Ladungsträger in einem Leitungsdraht und dann eine Analyse der Vorgänge bei Existenz eines stationären Elektronenstromes. Diese Überlegungen sind sehr kompliziert und für den Unterricht in der Sekundarstufe I nicht geeignet. Eine zufriedenstellende didaktische Erklärung des Phänomens ist äußerst schwierig, hier sollen verschiedene Varianten vorgestellt werden.

Konzept 1

Man stellt fest, dass eine zufriedenstellende Erklärung für die Entstehung des elektrischen Energiestromes nur mit Hilfe des dabei wirkenden elektrischen Feldes möglich ist. Da der Feldbegriff in der Sekundarstufe I nicht zur Verfügung steht, so muss man sich damit begnügen, den vorhandenen Sachverhalt zu konstatieren und auf eine weitere Erklärung des Phänomens verzichten. Dies mag zunächst unerfreulich erscheinen, doch man kann dies auch in einem anderen Lichte sehen; viele Erkenntnisse der modernen Forschung aus Naturwissenschaft und Technik können im Schulunterricht nicht erklärt werden, und es ist für einen Schüler durchaus eine positive Erfahrung, wenn er erkennt,

wie schwierig es ist, zu gesicherten naturwissenschaftlichen Erkenntnissen vorzudringen.

Konzept 2

Hier sucht man nach einem Modell, welches das vorliegende Phänomen einsichtig machen kann. Dabei sollte man sich vor Augen halten, dass ein Modell ersonnen wird um ein ganz bestimmtes Problem verständlich zu machen. Ein Modell hat einen eng begrenzten Gültigkeitsbereich, in unserem Fall geht es um eine Veranschaulichung des Energiestromes mit dem Ziel, nach Möglichkeit eine quantitative Erfassung des Energiestromes aus dem Modell herzuleiten. Gelingt dies, so hat das Modell viel geleistet. Über diesen Bereich hinaus sollte man das Modell nicht beanspruchen, denn es kann zu Fehldeutungen und Widersprüchen kommen. Der Wert eines Modells im angesprochenen Sinn bleibt aber dennoch erhalten. Ein bekanntes Beispiel aus der Optik mag dies unterstreichen. Die Wellenvorstellung leistet beim Licht außerordentlich viel, beim lichtelektrischen Effekt versagt sie jedoch vollständig - eine Deutung des Phänomens ist nur mit der Photonenvorstellung möglich. Trotz dieser Unzulänglichkeit der Wellenvorstellung wird man sie nicht vollständig über Bord werfen, sondern man wird ihren begrenzten Gültigkeitsbereich beachten und sie entsprechend (durchaus mit Nutzen) anwenden. Gleiches sollte bei dem nachfolgend vorgestellten Modell für die Deutung des elektrischen Energiestromes gelten.

Der wesentliche Punkt beim elektrischen Energiestrom ist das Strömen der elektrischen Energie von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät, also ein „Strömen“ nur in einer einzigen Richtung. Begleitet wird dieser einseitig ausgerichtete Energiestrom von einem sich im Kreis bewegenden Ladungsträgerstrom; bei Metallen ist dies ein Kreislauf der Elektronen vom negativen Pol der Quelle zum Elektrogerät, durch das Gerät und zurück zum positiven Pol der Quelle. Im Inneren der Quelle bewegen sich die Elektronen weiter vom positiven zum negativen Pol. Beide Ströme – Energiestrom und Elektronenstrom - hängen in irgendeiner Weise miteinander

zusammen, und die Aufgabe besteht nun darin, diesen Zusammenhang zu finden und nach Möglichkeit anschaulich darzustellen.

Zur Lösung des Problems kann man das folgende Modell verwenden. Wir betrachten ein Geschäft für Baumaterialien und eine Baustelle, wo ein Gebäude errichtet werden soll. Um das erforderliche Baumaterial vom Baugeschäft zur Baustelle zu befördern benötigt man Fahrzeuge. Diese werden im Baugeschäft beladen, fahren zur Baustelle, laden das Material dort ab und fahren leer zum Baugeschäft zurück, wo sie erneut beladen werden. Wir haben also einen Materialstrom vom Baugeschäft zur Baustelle (in nur einer einzigen Richtung), und einen Fahrzeugstrom, der einen Kreislauf vom Baugeschäft zur Baustelle und zurück beschreibt. Das Modell ist eine Analogie zu unserem elektrischen Problem. Dem Energiestrom entspricht der Materialstrom, dem Elektronenstrom entspricht der Fahrzeugstrom. Zur Lösung unserer Problemfrage, wie Energiestrom und Elektronenstrom zusammenhängen, führen wir eine entsprechende Betrachtung bei unserem Modell durch und übertragen dieses Ergebnis auf den elektrischen Fall. Wir stellen dazu folgende Überlegung an: Im Modell will der Bauunternehmer den Materialstrom vom Baugeschäft zur Baustelle vergrößern. Dazu hat er mehrere Möglichkeiten.

- Er kann auf jeden Lastwagen mehr Material aufladen, dies entspricht im elektrischen Fall einer Vergrößerung der Spannung U .
- Der Bauunternehmer kann den Fahrzeugstrom vergrößern. Dazu kann er sowohl die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge erhöhen als auch die Fahrzeuge schneller fahren lassen. Im elektrischen Fall ist die Anzahl der Elektronen im metallischen Leiter unveränderlich, ihre Driftgeschwindigkeit lässt sich jedoch steigern. Der Vergrößerung des Fahrzeugstroms entspricht eine Erhöhung der elektrischen Stromstärke I .

Fasst man beide Ergebnisse zusammen, so kann man daraus schließen, dass der Materialstrom sowohl der Zuladung als auch dem Fahrzeugstrom proportional ist. Übertragen auf den elektrischen Fall heißt dies, dass der Energiestrom proportional ist

dem Produkt aus der Spannung U und der Stromstärke I . Eine Dimensionsbetrachtung der beteiligten physikalischen Größen zeigt, dass im SI-System diese Proportionalität in eine Gleichheit übergeht, dass also gilt:

El. Energiestrom = Spannung U mal el. Stromstärke I

$$(\Delta W / \Delta t) = U \cdot I.$$

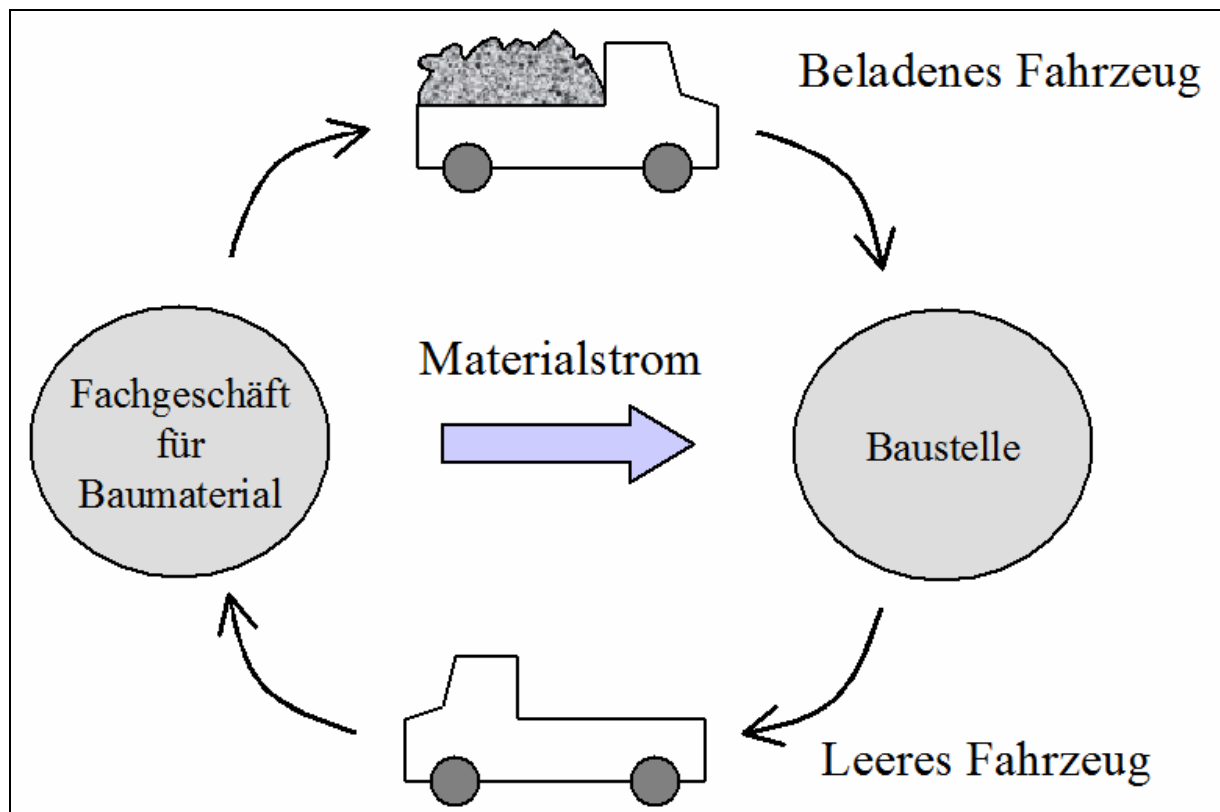


Abb. 2.5.3: Modellmäßige Veranschaulichung von elektrischem Energiestrom und Elektronenstrom. Dem Elektronenstrom entspricht der Kreislauf der Fahrzeuge, dem Energiestrom entspricht der nur in einer einzigen Richtung fließende Materialstrom vom Baugeschäft zur Baustelle.

Das vorgestellte Modell ist sehr anschaulich und gestattet die Herleitung des gewünschten Zusammenhangs zwischen dem elektrischen Energiestrom und den anderen elektrischen Größen durch Analogieschlüsse. Dies kann als Erfolg des Modells angesehen werden. Das Modell besitzt jedoch in anderer Hinsicht einen schwerwiegenden Nachteil. Dieser wird deutlich, wenn man bei dem elektrischen Versuch den Einschaltvorgang betrachtet. Im Baustellenmodell beginnt der Materialstrom erst dann kontinuierlich zu fließen, nachdem das erste Fahrzeug im Baugeschäft beladen wurde, dann zur Baustelle fährt und dort sein Material ablädt. Es vergeht also einige Zeit bis der Materialstrom nach dem Start der Fahrzeuge in Gang kommt; ist dies geschehen, so kann man von einem (mehr oder weniger) gleichmäßigen Materialstrom sprechen.

Entsprechend ist die Situation im elektrischen Fall. Gemäß der Modellvorstellung werden die Elektronen durch die Batterie mit Energie beladen, bewegen sich von dort zum Elektrogerät, geben die mitgeführte Energie an das Elektrogerät ab und bewegen sich zur Batterie zurück, um dort erneut mit Energie versorgt zu werden. Dieses Bild entspricht in keiner Weise der Realität. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen beträgt einige Millimeter pro Sekunde (!), und dies bedeutet, dass die Elektronen vom Elektrizitätswerk zu einem weit entfernten Haushalt Wochen oder gar Monate brauchen würden bis sie dort ankommen. Dies ist auch die Zeit, welche – nach diesem Modell – für den Transport der elektrischen Energie vom Elektrizitätswerk zum Haushalt nötig wäre. In eklatantem Widerspruch dazu steht die Erfahrung: Nimmt man in der Wohnung an einer Steckdose ein Elektrogerät in Betrieb, so ist die elektrische Energie de facto sofort verfügbar. Dies zeigt deutlich, dass sich die elektrische Energie in den Leitungen mit sehr großer Geschwindigkeit ausbreitet. Messungen belegen, dass in den Leitungen die Ausbreitung der elektrischen Energie mit Lichtgeschwindigkeit erfolgt. Damit stellt sich die Frage nach einer Modifizierung des Modells.

Konzept 3

Die Modellvorstellungen, welche in Konzept 2 vorgestellt wurden, hatten zwei Ziele. Zum einen wollte man die experimentell beobachtbare Driftbewegung der Elektronen aufzeigen, zum anderen sollte der von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät verlaufende Energiestrom gedeutet werden. Die Herleitung der Größe des Energiestroms aus der am Elektrogerät anliegenden elektrischen Spannung und dem Elektronenstrom ist ein Erfolg des Modells. Das Modell versagt dagegen vollständig bei der Frage wie schnell die Energie von der elektrischen Quelle zum angeschlossenen Elektrogerät übertragen wird. Im Modell des Konzepts 2 geschieht dieser Energietransport mit der gleichen Geschwindigkeit, mit welcher sich die Elektronen bewegen, also mit einer minimalen Geschwindigkeit (einige mm s^{-1}), während sich der Energiestrom de facto mit Lichtgeschwindigkeit längs des Leiters ausbreitet. Sucht man nach der Ursache für diese Schwäche in der Modellvorstellung, so zeigt sich, dass diese darin begründet liegt, dass in Konzept 2 der Ladungsträgerstrom (im Metall ein Elektronenstrom) und der Energiestrom starr miteinander gekoppelt sind. Als Folge davon breiten sich beide Ströme mit derselben Geschwindigkeit aus. Der entscheidende Punkt ist der, dass wir bei dem Elektronenstrom einen Materietransport haben, und dass der Energiestrom direkt an diesen Materiestrom gebunden ist und sich folglich mit derselben Geschwindigkeit wie dieser ausbreitet. Will man dies vermeiden, so muss man nach einer Modellvorstellung suchen, bei welcher der Elektronenstrom und der Energiestrom sich unabhängig voneinander ausbreiten. Nachfolgend werden einige Beispiele aufgezeigt, bei denen dies der Fall ist. Anschließend soll versucht werden, die betreffenden Vorstellungen auf den elektrischen Fall zu übertragen.

Beispiel 1: Querwelle in einem gespannten Seil

Ein Beispiel für die beiden genannten Bedingungen – Energietransport mit großer Ausbreitungsgeschwindigkeit bei so gut wie keinem Materietransport – ist eine Querwelle in einem elastischen Medium. Im Experiment benutzt man ein gespanntes

Seil aus elastischem Material, das am ebenen Fußboden des Seminarraums liegt. Führt man an einem Seilende aus der Ruhelage heraus eine Querbewegung und zurück aus, so breitet sich diese „Störung“ mit großer Geschwindigkeit im gespannten Seil aus, die „Welle“ läuft vom Seilanfang durch das ganze Seil hindurch bis zum Seilende. Den weiteren Verlauf des Versuchs, nämlich eine mögliche Reflexion der Querswelle am Seilende, wollen wir hier nicht weiter betrachten. Entscheidend an dieser Stelle ist der Tatbestand, dass sich der „Querausschlag“ mit großer Geschwindigkeit im elastischen Seil ausbreitet und dass mit dieser Ausbreitung der Welle ein Energietransport verbunden ist. Bei diesem Vorgang findet jedoch kein Materietransport in Ausbreitungsrichtung der Energie statt.

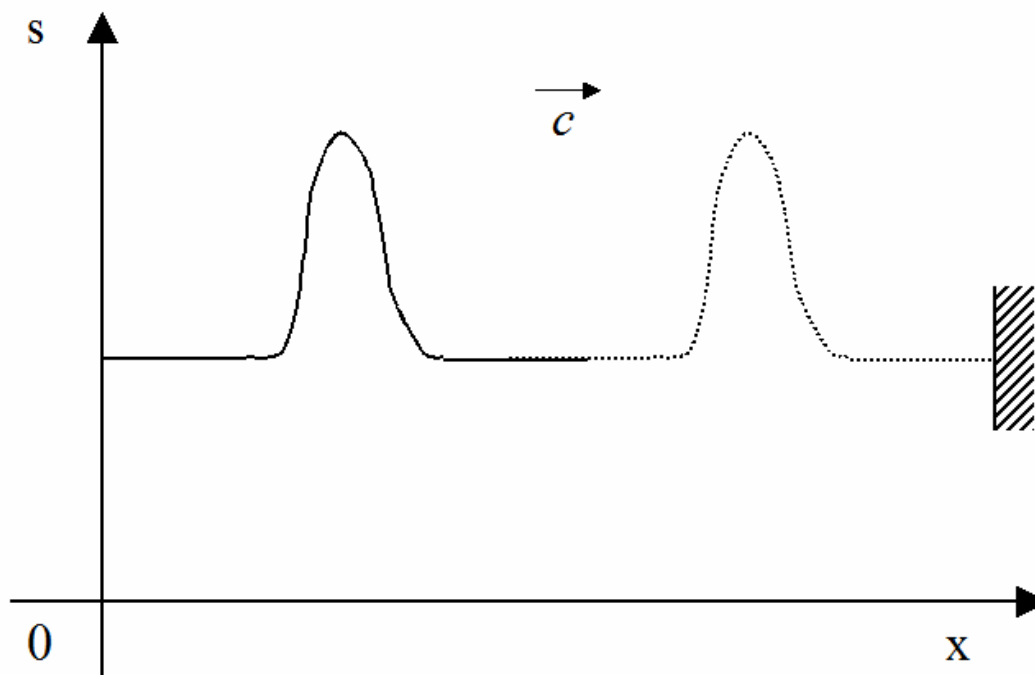


Abb. 2.5.4: Ausbreitung einer Querswelle in einem elastischen Medium.

Am linken Ende des gespannten Seiles erfolgt eine Querauslenkung, welche sich im Seil sehr schnell ausbreitet. Mit der Ausbreitung der Welle ist ein Energietransport in Richtung des Seiles (hier in Richtung der x-Achse) verbunden, eine Verschiebung der Position der schwingenden Teilchen erfolgt in dieser Richtung **nicht**.

Bei dem betrachteten Vorgang besteht lediglich quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle eine Bewegung des Seiles, die jedoch für den hier betrachteten Materietransport ohne Bedeutung ist. Denkt man sich das Seil in eine große Zahl von untereinander gekoppelten Materiepunkten aufgelöst, so bewegen sich diese Materiepunkte jeweils an einem festen Ort quer zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Als eindrucksvolles Beispiel für den außerordentlich großen Energiestrom bei der Ausbreitung einer Querswelle kann – mit gewissen Einschränkungen – ein Tsunami angesehen werden. Hier breitet sich die Energie mit großer Geschwindigkeit an der Meeresoberfläche aus; dabei bleiben die am Entstehungsort der Welle befindlichen Wasserteilchen unverändert an dieser Position der Erdoberfläche, während Tausende von Kilometern entfernt andere Wasserteilchen furchterliche Zerstörungen anrichten.

Beispiel 2: Elastischer Stoß bei Kugeln in einer Kugelrinne

Ein weiteres Experiment, das zeigen soll, dass sich Energie mit großer Geschwindigkeit in einem elastischen Medium ausbreiten kann ohne dass dabei ein Materietransport stattfindet, ist der elastische Stoß von Kugeln in einer Kugelrinne. Bei der Durchführung des Versuchs liegen mehrere gleich große Stahlkugeln, die sich berühren, hintereinander in einer Rinne. Trifft jetzt eine Kugel mit der Geschwindigkeit v auf die erste ruhende Kugel, so kommt diese stoßende Kugel zur Ruhe, der Stoß wandert mit großer Geschwindigkeit durch die in der Rinne ruhenden Kugeln bis zur letzten Kugel, diese setzt sich danach mit der Geschwindigkeit v in Bewegung. Auch hier kann man folgendes sehen: Es erfolgt eine Energieübertragung durch die Kugelskette hindurch mit großer Geschwindigkeit, ohne dass sich dabei die Glieder der Kugelskette in Richtung der Energieausbreitung bewegen – abgesehen von der letzten Kugel, welche die transportierte Energie deutlich sichtbar aufnimmt.

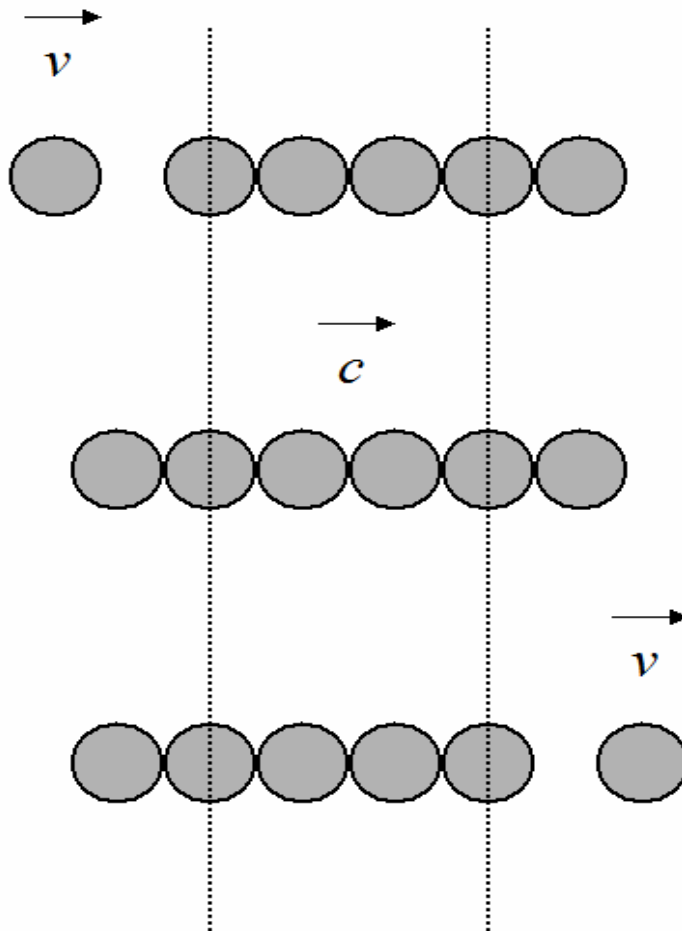


Abb. 2.5.5: Stoß bei elastischen Kugeln.

Auf mehrere ruhende Kugeln gleichen Materials und gleicher Größe trifft eine Kugel mit der Geschwindigkeit \vec{v} . Die stoßende Kugel kommt nach dem Stoß sofort zur Ruhe, der Stoß wandert sehr schnell durch die Kugeln hindurch. Der damit verbundene Energietransport führt dazu, dass sich die letzte Kugel von den zuvor ruhenden Kugeln weg bewegt.

Beispiel 3: Längswelle in einer Hooke'schen Feder

Das Experimentiergerät für diesen Versuch ist eine etwa 1 m lange Spiralfeder. Zur Durchführung des Versuchs spannt man diese Feder am ebenen Fußboden mit deutlicher Dehnung aus. Die Feder sollte gut gespannt, aber nicht überdehnt sein. Das eine Ende der Feder ist fixiert, am anderen Ende agiert der Experimentator. Zur Erzeugung einer Längswelle bewegt man das freie Ende der Feder ein kleines Stück in Richtung des fixierten Federendes und dann zurück in die Ausgangslage; dadurch wird in der Feder eine Art „Verdichtungsstoß“ erzeugt.

Dieser Stoß wandert als longitudinale Störung durch die Feder hindurch zu ihrem fixierten Ende; dort erfolgt eine Reflexion, die hier aber nicht weiter untersucht werden soll.

Auch bei diesem Versuch wird deutlich, dass Energie sehr schnell durch ein elastisches Medium hindurchwandern kann ohne dass dies mit einem Materietransport verbunden ist.

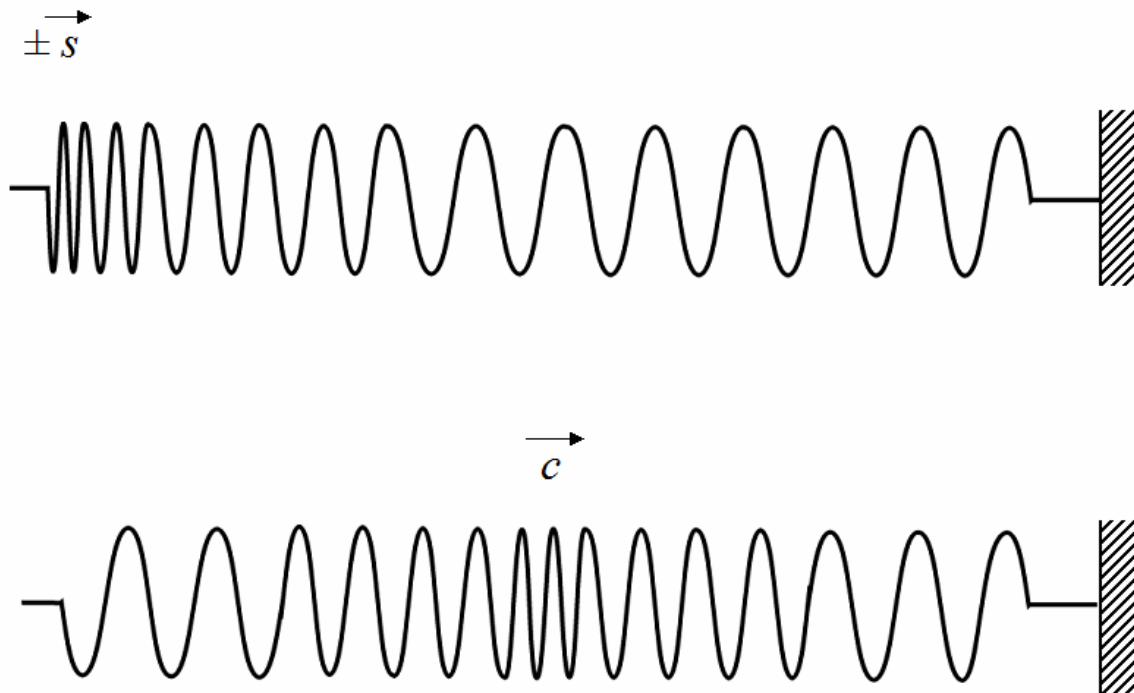


Abb. 2.5.6: Ausbreitung einer Längswelle in einer elastischen Feder

Ein „Stoß“ in einer gespannten Hooke’schen Feder breitet sich in Längsrichtung der Feder aus. Der damit verbundene Energietransport erfolgt mit relativ großer Geschwindigkeit, die einzelnen schwingungsfähigen Segmente der elastischen Feder bleiben jedoch ortsfest.

Mit Hilfe der gespannten Hooke’schen Feder lässt sich noch ein weiteres Phänomen sehr schön zeigen. Man kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle leicht beeinflussen. Dies kann dadurch geschehen, dass man die Feder unterschiedlich stark spannt. Bei schwach gespannter Feder ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle relativ klein, bei stark gespannter Feder ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit verhältnismäßig groß. Erklärt werden kann dies mit einer

entsprechenden Modellbetrachtung: Man stellt sich die Feder als ein Gebilde vor, das aus vielen einzelnen schwingungsfähigen Teilchen besteht, welche untereinander gekoppelt sind. Entsteht an einer Stelle der Feder eine Längsauslenkung, so beginnt das Teilchen zu schwingen und diese Schwingung wird durch die Kopplung der Teilchen nacheinander auf das jeweils benachbarte Teilchen übertragen. Ist die Kopplung schwach, so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle klein, ist die Kopplung stark (bei entsprechend größerer Spannung der Feder), so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle groß. Diese modellmäßige Deutung wird durch das Experiment bestätigt: Die Schallgeschwindigkeit ist in Gasen (bei denen die Kopplung zwischen den einzelnen schwingungsfähigen Teilchen schwach ist) relativ klein, sie ist in Flüssigkeiten größer (weil dort die Kopplung zwischen den schwingungsfähigen Partikeln größer ist) und sie ist in festen Körpern noch größer (weil dort die Kopplung noch größer ist als bei Flüssigkeiten).

Ein wesentlicher Punkt der im vorangegangenen Abschnitt betrachteten Beispiele besteht darin, dass in diesen Fällen ein Energietransport mit großer Geschwindigkeit erfolgt ohne dass es dabei zu einem Materietransport kommt. Im Konzept 2 bestand die unbefriedigende Situation darin, dass dieser Sachverhalt bei dem dort vorgestellten Modell nicht erfüllt war: Nach der dortigen Vorstellung war der Energietransport untrennbar an die Driftbewegung der Elektronen gebunden, er erfolgte also extrem langsam - und dies ist ein Ergebnis, das zur experimentellen Erfahrung in eklatantem Widerspruch steht. Eine neu zu entwickelnde Modellvorstellung für den Transport elektrischer Energie in einem metallischen Leiter muss also das Ziel verfolgen, eine diesbezügliche Betrachtungsweise zu finden, welche mit der Erfahrung überein stimmt. Dabei sollte die verschwindend kleine Driftbewegung der Elektronen als Teil der neuen Vorstellung erhalten bleiben.

Um zu einer Lösung zu gelangen sind idealisierende Annahmen unumgänglich. Wir betrachten einen metallischen Leiter, er besteht aus den festsitzenden positiv geladenen Atomrümpfen und

den beweglichen, negativ geladenen Elektronen. Wie bereits erwähnt wurde ist es zulässig, in einem metallischen Leiter die Elektronen wie eine nahezu inkompressible Flüssigkeit anzusehen (vergleichbar den Atomen in einem festen Körper). Zur Vereinfachung der Betrachtungsweise sollen weiter die elektrisch positiven Atomrümpfe außer Betracht bleiben. Wenn wir uns jetzt einen metallischen Leiter vorstellen so ist dieser gleichmäßig mit Elektronen „gefüllt“ (wie beispielsweise ein langes Rohr mit Wasser gefüllt ist). Um eine anschauliche Vorstellung vom Transport elektrischer Energie in einem metallischen Leiter zu bekommen werfen wir einen Blick auf den Energietransport in einer gespannten Hooke'schen Feder. Dort konnte man am freien Ende der Feder in einem kleinen Bereich kurzzeitig eine Verdichtung erzeugen, ihr also eine Art „Energiestoß“ zuführen. Dieser Vorgang war für den Beobachter deutlich sichtbar, ebenso die Tatsache, dass dieser Energiestoß in Form einer Längswelle mit relativ großer Geschwindigkeit durch die Feder hindurch wandert.

Jetzt wollen wir diese Erfahrung verwenden um eine entsprechende Modellvorstellung im elektrischen Fall zu entwickeln. Dazu denken wir uns an dem einen Ende des metallischen Leiters ein lokal begrenztes, relativ dicht gepacktes „Elektronenpaket“ durch einen geeigneten äußeren Prozess hergestellt - realisiert beispielsweise dadurch, dass wir dieses Ende des metallischen Leiters mit einer elektrisch negativ geladenen Konduktorkugel berühren. Folglich ist an diesem Ende des Leiters die Dichte der Elektronen etwas größer als im übrigen Leiter. Energetisch gesehen kann man dies folgendermaßen ausdrücken: Die Herstellung der relativ großen „Elektronendichte“ auf der Konduktorkugel ist nur durch Zufuhr von Energie möglich (wir entnehmen diese beispielsweise einem Netzgerät), und durch das Aufbringen dieses dicht gepackten „Elektronenpaketes“ auf das eine Ende des Leiters führen wir diesem eine bestimmte Portion an Energie zu. Wir geben dem Leiter also eine Art „Stoß“ und überlegen uns dann, was weiter geschieht.

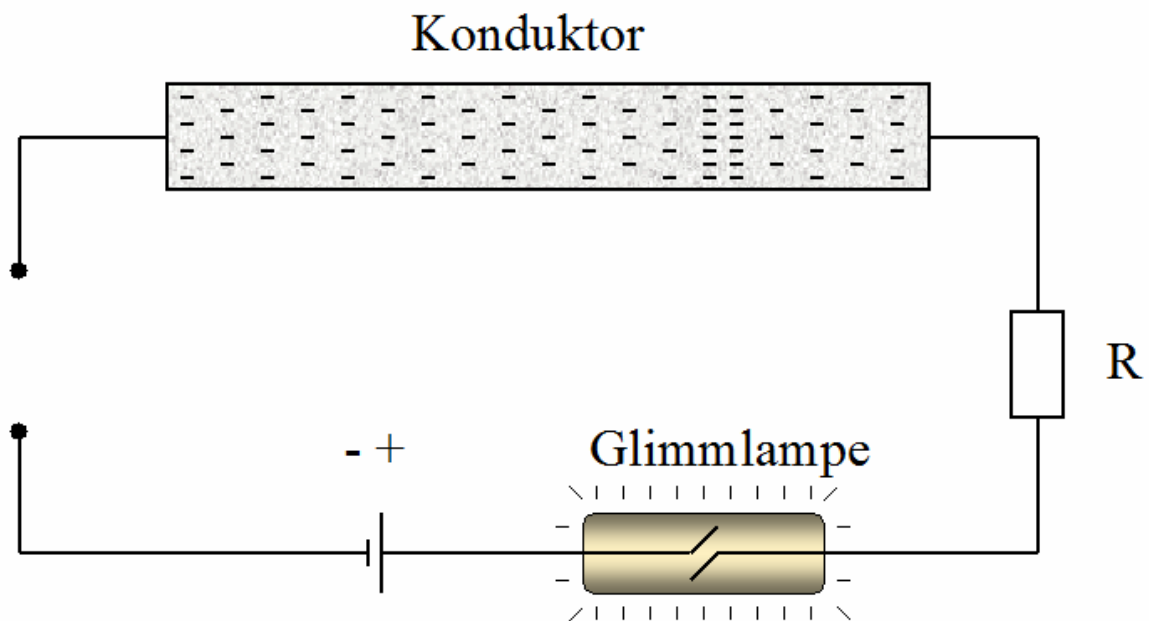
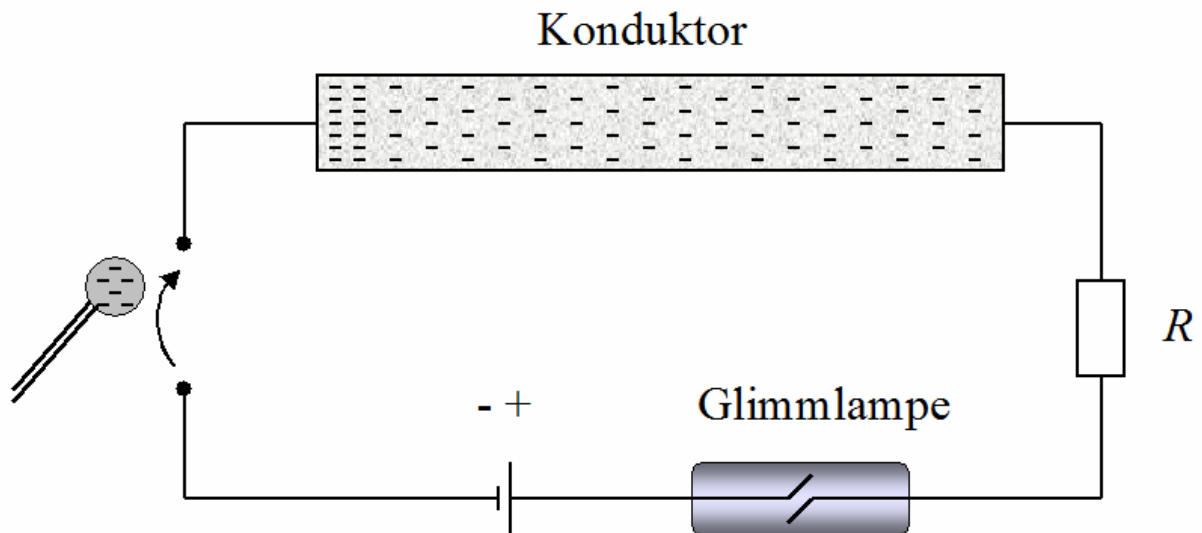


Abb. 2.5.7: Modellmäßige Betrachtung eines „elektrischen Stoßes“ in einem metallischen Leiter.

Man berührt ein Ende des Leiters mit einem negativ geladenen Konduktor und erzeugt dort ein „Elektronenpaket“, das auch als räumlich begrenztes „Energiepaket“ betrachtet werden kann. Abstoßende elektrische Kräfte sind dann die Ursache dafür, dass diese Energie mit großer Geschwindigkeit durch den Leiter strömt. Ein Materietransport findet dabei **nicht** statt.

An dem betrachteten freien Ende des Leiters haben wir also (nach Berühren mit der elektrisch negativ geladenen Konduktorkugel) eine etwas größere Elektronendichte als im übrigen Leiter. Zwischen diesen dichter gepackten Elektronen wirken abstoßende Coulomb – Kräfte, welche die Abstände zwischen den einzelnen Elektronen vergrößern. Dies bedeutet, dass die in benachbarten Bereichen liegenden Elektronen mit „normaler“ Elektronendichte ihre gegenseitigen Abstände etwas verkleinern, folglich wird dort die Elektronendichte größer. Dieser Vorgang setzt sich im Leiter fort. Die zu Beginn am freien Ende des Leiters hergestellte größere Elektronendichte wandert also durch den Leiter hindurch - vergleichbar der Ausbreitung eines Wellenberges (allgemeiner: einer „Störung“) in einer elastischen Feder. Wichtig ist dabei der Hinweis, dass sich die unterschiedlich große Verteilung der Elektronen im Leiter (also ihre Dichteänderung) mit großer Geschwindigkeit ausbreitet. Energetisch gesehen bedeutet dies, dass die anfänglich auf den Leiter aufgebrachte „Energieportion“ durch den Leiter wandert wie bei einer Welle in einem elastischen Medium. Man könnte den Vorgang auch als eine Art „**elektrischer Stoß**“ bezeichnen, welcher zwischen benachbarten Elektronen stattfindet. Mit dieser Darstellung ist ein Prozess der Übertragung elektrischer Energie beschrieben, welcher ohne Materietransport mit sehr großer Geschwindigkeit erfolgt.

Die vorausgegangenen Überlegungen beschreiben ein idealisiertes Modell der Übertragung elektrischer Energie in einem metallischen Leiter. Die Vereinfachung besteht unter anderem darin, dass ein einzelner Energiestoß betrachtet wird, wohingegen man es bei einem geschlossenen Leiterkreis und einem darin befindlichem Elektrogerät mit einer kontinuierlichen Energieübertragung zu tun hat. Der nächste Schritt muss also die bisherige Betrachtungsweise erweitern und den Übergang vom einzelnen Energiestoß zum kontinuierlichen Energiestrom herstellen.

Ausgangspunkt unserer Überlegungen bezüglich des Strömens von elektrischer Energie war der „elektrische Stoß“. Dieser kam dadurch zustande, dass der langgestreckte elektrische Leiter an einem Ende mit einer negativ geladenen Konduktorkugel berührt wurde; danach breitete sich die elektrische Energie ähnlich wie ein Stoß in einem elastischen Stab aus. Die näheren Einzelheiten dieses Vorgangs sollen hier nicht weiter untersucht werden, es mag die grundsätzliche Sichtweise genügen. Wollen wir jetzt einen kontinuierlichen elektrischen Energiestrom anstreben, so müssen wir nach möglichst kurzer Zeit das freie Ende des Leiters erneut mit einer negativ geladenen Konduktorkugel berühren. Geschieht dies sehr schnell hinter einander - im Grenzfall unendlich schnell - so haben wir den Zustand eines kontinuierlichen Energiestromes erreicht. Das Verfahren ist grundsätzlich möglich, wenn auch etwas mühsam.

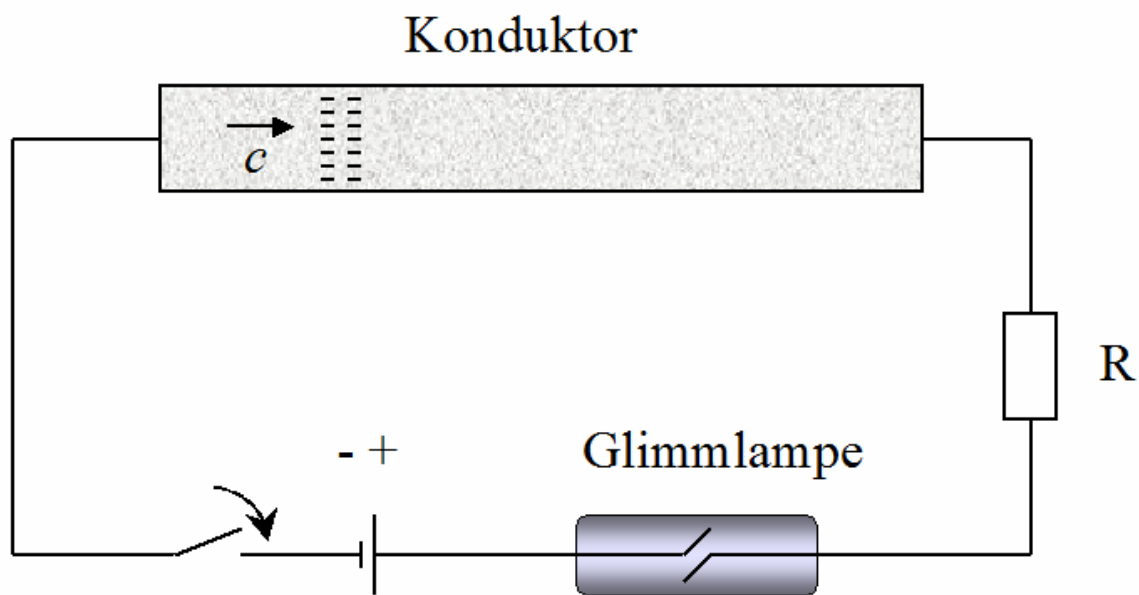


Abb. 2.5.8: Zum Übergang von aufeinander folgenden „elektrischen Stößen“ in einen kontinuierlichen elektrischen Energiestrom.

Wird der Schalter im elektrischen Kreis kurzzeitig auf Durchlass geschaltet, so wandert ein „elektrischer Stoß“ in Form eines räumlich begrenzten Energiepaketes mit großer Geschwindigkeit durch den Leiter. Steht der Schalter dauernd auf Durchlass, so entsteht ein kontinuierlicher elektrischer Energiestrom.

Eine weitere Möglichkeit, unser Ziel eines kontinuierlichen Energiestromes zu erreichen, bietet die folgende Überlegung. Der erwähnte „elektrische Stoß“ kann noch auf eine andere Weise realisiert werden, und zwar dadurch, dass man unseren metallischen Leiter über einen Schutzwiderstand und einen Schalter an eine elektrische Quelle anschließt. Wird dann der Schalter für kurze Zeit auf „Durchlass“ gestellt, so wird von der elektrischen Quelle ein „elektrischer Stoß“ durch den Leiter gesandt. Damit wird – wie bei dem Verfahren mit dem Konduktor – ein „Energie – Paket“ auf den Weg geschickt. Wenn wir den Schalter mehrmals hintereinander betätigen, so wandern nacheinander elektrische Stöße durch den Leiter, und zwar in umso kürzeren zeitlichen Abständen je schneller wir den Schalter betätigen. Den Grenzfall des „unendlich schnellen Schaltens“ kann man herstellen indem man den Schalter dauernd auf „Durchlass“ stellt; damit wird ein kontinuierlicher elektrischer Energiestrom in Gang gesetzt.

Der hier vorgestellte Gedankengang vermittelt ein Bild davon wie wir uns die Entstehung und den Prozess des Strömens von elektrischer Energie in einem metallischen Leiter vorstellen können. Dieses Konzept möchte für Schüler der Sekundarstufe I Vorstellungen entwickeln, welche es diesen Schülern ermöglichen, den Transport von elektrischer Energie in metallischen Leitern in nachvollziehbarer Weise zu deuten.

Bei dem Aufsuchen eines didaktischen Weges oder einer Modellvorstellung sind im naturwissenschaftlichen Unterricht – wie mehrfach erwähnt - Vereinfachungen und Idealisierungen unumgänglich. Man sollte daher nicht vergessen, dass Modelle für eine ganz bestimmte Zielsetzung ersonnen werden und daher nur einen auf diese didaktische Absicht hin bezogenen begrenzten Gültigkeitsbereich besitzen. Die Tatsache, dass Modellvorstellungen außerhalb dieses Bereiches versagen oder gar zu Widersprüchen führen können, spricht nicht gegen diese Vorgehensweise, sondern zeigt den Schülern eine der großen Schwierigkeiten naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung, was durchaus positiv gesehen werden kann.

Ergänzung 1: Inkompressibilität und Elastizität

In unserer Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass das Elektronenkollektiv zwei Eigenschaften besitzen soll, die scheinbar schwer miteinander vereinbar sind: Das Kollektiv ist fast nicht kompressibel und es ist dennoch elastisch, das heißt in ihm kann sich ein Energiestoß nach dem Prinzip einer elastischen Welle mit großer Geschwindigkeit ausbreiten. Diese beiden Eigenschaften bilden keinen Widerspruch. Den Beweis liefert ein bekanntes Material, nämlich Stahl: Er ist fast nicht kompressibel und dennoch äußerst elastisch.

Ergänzung 2: Zur Energieübertragung

Unsere vorausgegangene Betrachtung beschreibt die Ausbreitung eines „Energie-Stoßes“ im Kollektiv der Elektronen eines metallischen Leiters. Experimentell realisiert (mindestens im Idealfall) wird dies durch Zufuhr einer bestimmten Anzahl von Elektronen an einem Ende des Leiters mit Hilfe eines geladenen Konduktors oder durch ein kurzes Ein- und Ausschalten einer von außen angelegten elektrischen Spannung. Es handelt sich also zunächst um einen nicht-stationären Vorgang. Der Übergang zum stationären Fall wird dadurch bewerkstelligt, dass eine äußere Spannung angelegt und diese andauernd aufrecht erhalten wird. Dies hat zwei Effekte zur Folge:

- Es entsteht – durch den Leiter hindurch – die bereits beschriebene kontinuierliche Ausbreitung von Energie mit Lichtgeschwindigkeit längs des Leiters.
- Als Konsequenz dieser (mit unendlich großer Frequenz) erfolgenden elektrischen Energie-Stöße wandert das Elektronenkollektiv mit einer minimalen Driftgeschwindigkeit (von einigen Millimetern pro Sekunde) durch den Leiter hindurch. Die räumliche Verteilung der Elektronen in ihrer Gesamtheit bleibt dabei im Laufe der Zeit unverändert (ist also stationär); es findet lediglich eine stets neue Besetzung der „Aufenthaltssorte“ der einzelnen Elektronen statt.

III. Weitere elektrische und magnetische Phänomene - Die Feldvorstellung

Das Wort „Feld“ der Alltagssprache bezeichnet ursprünglich so viel wie Boden, Erde oder Weide. In der Physik wird die Formulierung „Feld“ in unterschiedlicher Bedeutung gebraucht, zwei Beispiele mögen dies erläutern. In einem Zimmer ist die Lufttemperatur nicht überall gleich, man kann jedem Raumpunkt des Zimmers die dort vorhandene Temperatur zuordnen und spricht in diesem Fall von einem „Temperaturfeld“; da die Temperatur ein Skalar ist, so handelt es sich bei einem Temperaturfeld um ein Skalarfeld. Ein anderes Beispiel betreffe einen strömenden Bach. Das fließende Wasser bewegt sich, in jedem vom Wasser erfüllten Raumpunkt besitzen die Wasserteilchen eine bestimmte Geschwindigkeit, man spricht von einem Strömungs- oder Geschwindigkeitsfeld. Da es sich bei der Geschwindigkeit um einen Vektor handelt, so spricht man von einem Vektorfeld. In beiden Fällen, beim Skalar- und beim Vektorfeld, kann der beschriebene Zustand im Laufe der Zeit unveränderlich sein (man spricht dann von einem stationären Feld), er kann sich im Laufe der Zeit aber auch ändern, man bezeichnet dies dann als ein zeitlich veränderliches Feld. Sucht man bei den beschriebenen Beispielen nach grundlegenden gemeinsamen Merkmalen, so gelangt man zu folgender allgemeinen Definition eines Feldes:

Definition: Unter einem Feld versteht man die Verteilung einer physikalischen Größe, welche als Funktion der Raum-Zeit-Koordinaten dargestellt werden kann.

In der geschichtlichen Entwicklung der Physik ist der Begriff des Feldes eng mit dem Namen von Michael FARADAY verbunden. Stellen wir uns zwei elektrisch geladene kleine Kugeln vor, welche sich in einem bestimmten Abstand voneinander befinden

sollen, so wissen wir auf Grund des Colomb'schen Gesetzes, dass die beiden elektrisch geladenen Kugeln aufeinander Kräfte ausüben, welche von der Größe der Ladungen, deren gegenseitigem Abstand und von dem zwischen den Kugeln befindlichen Medium abhängen. Die Frage von Faraday war nun: „Wie gelangt die Wirkung der Kraft von der einen Kugel zur anderen?“ Die Antwort Faradays ging von der damals verbreiteten Vorstellung des Dynamismus aus, einer Betrachtungsweise, welche mit den heutigen Begriffen als „Energieprinzip“ beschrieben werden kann. Nach dieser Auffassung wird der Raum in der Umgebung eines elektrisch geladenen Körper durch die elektrische Ladung in seiner Struktur verändert, der Raum bekommt durch die elektrische Ladung Vorzugsrichtungen. Diese Vorzugsrichtungen lassen sich in jedem Raumpunkt experimentell belegen, wenn an diesen Raumpunkt ein zweiter elektrisch geladener Körper gebracht wird, welcher dann nach dem Coulomb'schen Gesetz eine Kraft erfährt. Dies ist für jeden Raumpunkt möglich, die Richtung der wirkenden Kräfte lässt sich durch Linien kennzeichnen. Der durch die bestehende elektrische Ladung veränderte Raum mit den darin auftretenden physikalischen Größen wird als „Feld“ bzw. „elektrisches Feld“ bezeichnet, die veränderte Raumstruktur kann durch Feldlinien beschrieben werden. Die dargelegte Betrachtung gilt nicht nur für elektrisch geladene Körper und die damit verknüpften Felder, sie kann auch auf das Gebiet des Magnetismus und der Gravitation übertragen werden und führt dann zu den Begriffen des Magnet- und des Gravitationsfeldes. Faradays Überlegungen wurden später von James Clerk MAXWELL fortgeführt und fanden ihren Niederschlag in den beiden Maxwell'schen Gleichungen (1862), welche zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder miteinander verknüpfen. Die Bedeutung der Maxwell'schen Gleichungen auf erkenntnistheoretischem Gebiet liegt vor allem darin, dass durch die Leistung Maxwells der Begriff des Feldes einen herausragenden Platz im Gedankengebäude der Physik

erhielt. Im Sinne von Faraday und Maxwell kann folgende Definition für ein Feld genannt werden:

Defintion: Unter einem Feld im Sinne von Faraday und Maxwell versteht man den Tatbestand, dass in einem bestimmten Raumgebiet ein physikalischer Zustand herrscht derart, dass in jedem Raumpunkt auf einen geeigneten Probekörper eine Kraft ausgeübt wird.

Diese Definition geht also davon aus, dass beispielsweise durch einen elektrisch geladenen Körper in dessen Umgebung ein elektrisches Feld entsteht und dass dieses elektrische Feld experimentell dadurch nachgewiesen werden kann, dass ein kleiner, elektrisch geladener Körper (ein so genannter Indikator) in das Feld eingebracht wird und dass dann - als Folge der Existenz des Feldes - auf diesen Indikator eine Kraft wirkt. Erkenntnistheoretisch ist dabei von Bedeutung, dass das durch den erstgenannten Körper erzeugte Feld auch dann existieren soll, wenn kein Indikator vorhanden ist.

Zum leichteren Verständnis der weiteren Vorgehensweise sei eine didaktische Bemerkung angefügt, welche die Frage betrifft, in welcher Reihenfolge die drei Felder (Gravitationsfeld, elektrisches Feld, Magnetfeld) besprochen werden sollen. Im vorliegenden Fall wird zuerst das elektrische Feld behandelt und danach das Magnetfeld; die Besprechung des Gravitationsfeldes kann in einer Art Nachbetrachtung erfolgen. Das Ziel besteht darin für die Beschreibung der drei Felder eine einheitliche Struktur anzustreben. Diese Struktur wird im Physikunterricht der Schule am ehesten am Beispiel des elektrischen Feldes sichtbar und soll deshalb am Anfang der Betrachtungen stehen. Anschließend soll versucht werden, die allgemeinen Merkmale dieser Struktur - ausgehend vom elektrischen Feld - zu ermitteln. Diese Betrachtungsweise kann dann auf das Magnetfeld und das Gravitationsfeld übertragen werden.

1. Das elektrische Feld – eine Folge ruhender Träger elektrischer Ladungen

Nach dem Coulomb'schen Gesetz üben zwei elektrisch geladene Körper aufeinander Kräfte aus, auch über größere Entfernungen hin. Damit stellt sich die Frage, wie diese Einwirkung von dem einen Körper zu dem anderen gelangen kann. Seit der Entdeckung des Gravitationsgesetzes suchte man dafür ein Zwischenmedium verantwortlich zu machen. Es war Michael FARADAY (1791 - 1867) , welcher mit der Feldvorstellung und dem dazugehörigen Begriff der Feldlinien einen anderen Weg ging. Faraday glaubte, dass elektrisch geladene Körper den Raum in eine Art „Spannungszustand“ versetzen und so auf andere elektrisch geladene Körper wirken können. Der Grundgedanke von Faraday wurde später von James Clerk MAXWELL (1831 - 1879) aufgegriffen und in die mathematische Form von Feldgleichungen gebracht. Den Begriff des elektrischen Feldes kann man nach Faraday folgendermaßen beschreiben:

Den Raum in der Umgebung eines elektrisch geladenen Körpers bezeichnet man als elektrisches Feld. Durch die elektrische Ladung wird der Raum verändert, er erhält Vorzugsrichtungen, welche durch sog. „Feldlinien“ beschrieben werden können. Die Feldlinien geben in jedem Raumpunkt die Richtung der Kraft an, welche auf einen eingebrachten Probekörper mit positiver Ladung ausgeübt wird.

Durch die genannte Definition mit dem positiv geladenen Probekörper erhalten die Feldlinien einen Durchlaufsinne, aus welchem die Richtung der auf den eingebrachten Probekörper wirkenden Kraft ermittelt werden kann, **nicht** jedoch der Betrag dieser Kraft. Eine relative Aussage über den Betrag der Kraft liefert die Feldliniendichte; je größer sie ist, um so größer ist der Betrag der Kraft.

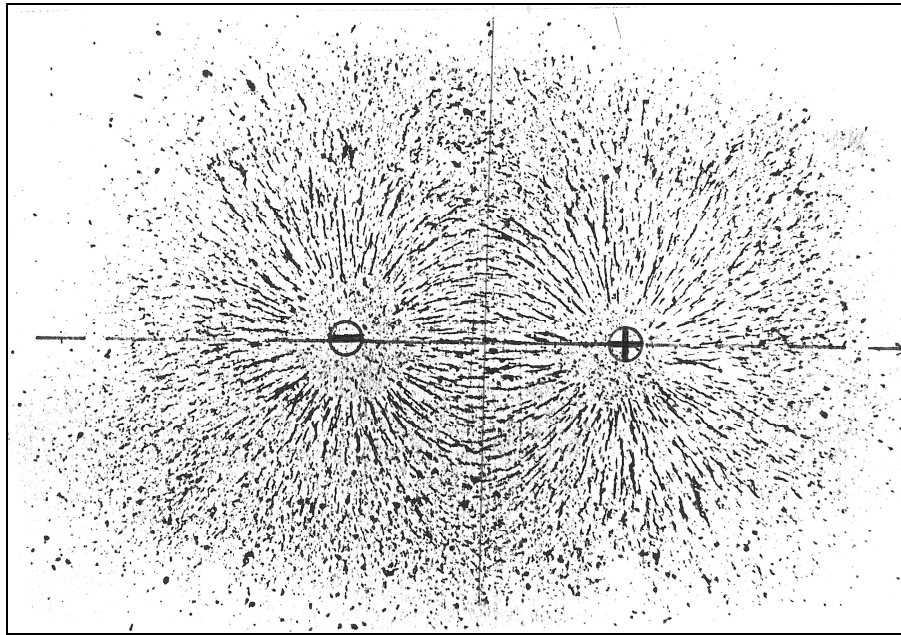


Abb. 3.1.1: Darstellung eines elektrischen Feldes mit „Feldlinien“ zwischen zwei elektrisch geladenen Kugeln unterschiedlicher Ladungsart (unterschiedlichen Vorzeichens). Das Bild ist ein ebener Schnitt durch den dreidimensionalen Raum und muss um eine Achse, welche die beiden Kugelmittelpunkte verbindet, rotationssymmetrisch ergänzt werden.

1.1 Die elektrische Feldstärke -

Eine Größe zur quantitativen Beschreibung des elektrischen Feldes

Die Feldlinien beschreiben ein elektrisches Feld in qualitativer Weise. Um zu einer quantitativen Aussage über die Stärke des Feldes zu kommen, muss ein geeignetes Messverfahren gefunden werden. Dazu kann man entweder auf die Ursache des elektrischen Feldes zurückgreifen, also auf seine Herstellung durch getrennte elektrische Ladungen, oder man kann die Wirkung des elektrischen Feldes auf einen passenden Indikator untersuchen. Dieser letztere Weg wurde bei der Definition der elektrischen Feldstärke gewählt, in dem man einen elektrisch positiv geladenen Probekörper in das Feld einbringt und die Kraft misst, welche das Feld auf diesen Probekörper ausübt. Um ein

korrektes Ergebnis für die zu messende Feldstärke zu erhalten, muss gefordert werden, dass die Ladung des Probekörpers das ursprüngliche Feld möglichst wenig verändert, was durch eine relativ kleine Ladung $(+q)$ des Probekörpers erreicht werden kann. Damit erhält man folgende Definition der elektrischen Feldstärke:

$$\text{El. Feldstärke} = \frac{\text{Kraft auf positiv geladenen Probekörper}}{\text{elektrische Ladung des Probekörpers}} .$$

$$\vec{E} = \vec{F} / q .$$

Die elektrische Feldstärke ist demnach eine vektorielle Größe, ihre Einheit ergibt sich zu Newton / Coulomb (N C^{-1}). Berücksichtigt man, dass die Einheit 1 V durch 1 J C^{-1} ausgedrückt werden kann, so lässt sich die Einheit der elektrischen Feldstärke auch als 1 V m^{-1} schreiben.

Die obige Festlegung der elektrischen Feldstärke kann am Plattenkondensator verdeutlicht werden. Der Kondensator wird mit der Spannung U aufgeladen, es bildet sich zwischen den beiden Platten ein homogenes elektrisches Feld aus. Als Probekörper dient ein kleines Holunderkügelchen an einem Perlonfaden. Zur Aufbringung der positiven Ladung wird das Kügelchen mit der positiv geladenen Kondensatorplatte vorsichtig berührt und dann losgelassen. Im Schattenwurf kann die Auslenkung des Kügelchens in Richtung der negativ geladenen Platte sichtbar gemacht werden. Aus dieser Auslenkung x , der Fadenlänge l und der Masse m des Kügelchens kann die vom elektrischen Feld auf das Kügelchen ausgeübte Kraft \vec{F} mit trigonometrischen Beziehungen bestimmt werden. Dazu benützt man die beiden ähnlichen Dreiecke, welche von den auf das Kügelchen wirkenden Kräften und von dem ausgelenkten Pendel

im Vergleich zur Ausgangslage (ohne Feld) gebildet werden. Für kleine Winkel folgt:

$$F / F_G = x / l ,$$

wobei F_G den Betrag der Gewichtskraft des Kügelchens bedeutet. Mit den folgenden Daten kann die elektrische Feldstärke berechnet werden.

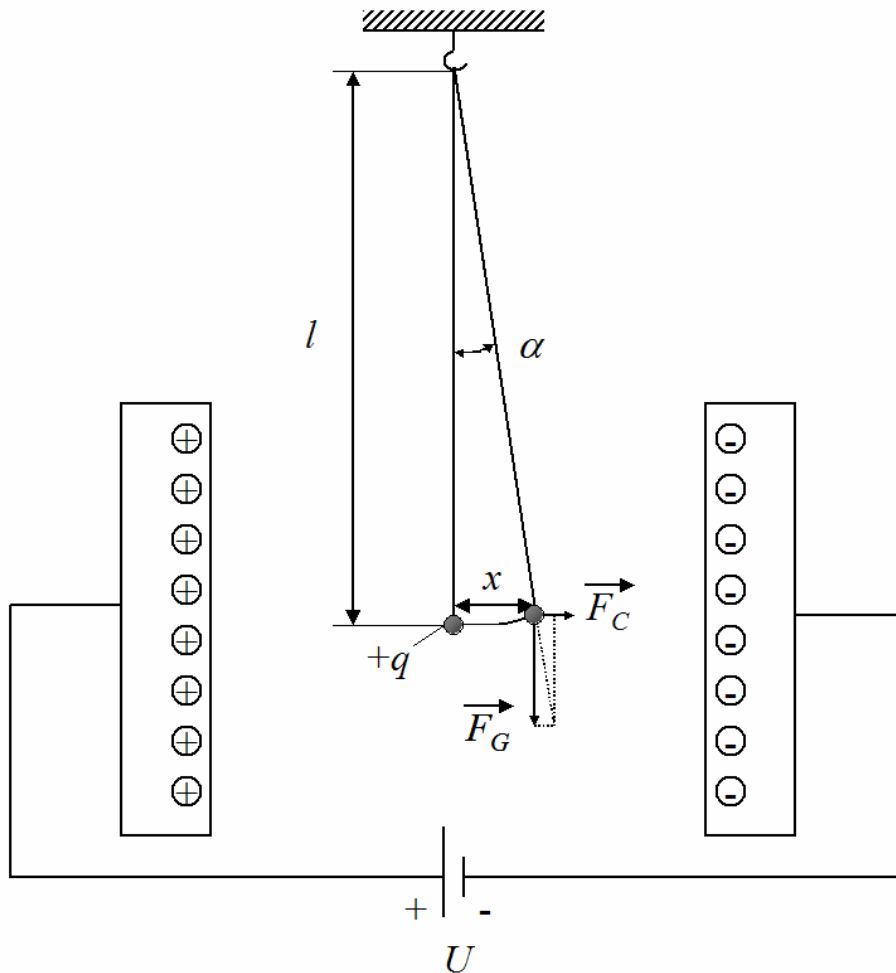


Abb. 3.1.2: Bestimmung der elektrischen Feldstärke eines Plattenkondensators durch die Kraft auf eine kleine, positiv geladene Kugel mit der elektrischen Ladung der Größe $+q$.

Masse des Kügelchens:	$m = 0,51 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
Auslenkung:	$x = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Fadenlänge:	$l = 0,90 \text{ m}$
Ladung des Kügelchens:	$+q = 10 \cdot 10^{-10} \text{ C}$

Die Ladung des Kügelchens kann grundsätzlich nach der Definition der Einheit der elektrischen Ladung bestimmt werden, zweckmäßigerweise wird dies jedoch mit einem entsprechenden Messverstärker geschehen. Aus den obigen Daten ergibt sich:

$$|\vec{F}| = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

$$|\vec{E}| = 5,6 \cdot 10^4 \text{ N C}^{-1}.$$

Wie an anderer Stelle gezeigt wird lässt sich die elektrische Feldstärke im Inneren eines Plattenkondensators auch auf folgende Weise direkt bestimmen:

$$|\vec{E}| = U / d ,$$

wobei U die angelegte Spannung und d den Plattenabstand bedeuten. Es gelten im vorliegenden Fall die Daten:

Angelegte Spannung:	$U = 4000 \text{ V}$
Plattenabstand:	$d = 0,07 \text{ m}$

Damit ergibt sich für die Berechnung der Feldstärke eine Kontrollmöglichkeit.

$$|\vec{E}| = (4000 / 0,07) \text{ V m}^{-1} = 5,7 \cdot 10^4 \text{ V m}^{-1}$$

$$|\vec{E}| = 5,7 \cdot 10^4 \text{ N C}^{-1}.$$

Von praktischer Bedeutung ist die Frage nach der elektrischen Feldstärke \vec{E}_r des radialsymmetrischen Feldes einer elektrisch geladenen Kugel. Das Problem lässt sich mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetzes lösen. Ist Q diejenige Ladung auf der Kugel, welche das elektrische Feld hervorruft, so bringt man in

Gedanken im Abstand r vom Mittelpunkt dieser Kugel die (auf einem kleinen Kügelchen befindliche) Probeladung $+q$ an. Die Kraft zwischen beiden Kugeln beträgt dann nach Coulomb:

$$|\vec{F}| = (1 / 4\pi\epsilon_0) \cdot (Q q / r^2) .$$

Für die elektrische Feldstärke \vec{E} gilt allgemein:

$$\vec{E} = \vec{F} / q ,$$

somit ergibt sich für die Feldstärke des radialsymmetrischen Feldes einer Kugel:

$$|\vec{E}_r| = (1 / 4\pi\epsilon_0) \cdot (Q / r^2) .$$

Bei bekannter Ladung der Kugel ist das Feld bestimmt. An dieser Stelle sei noch auf einen Zusammenhang hingewiesen, welcher bereits Coulomb bekannt war. Wenn sich auf einer Kugeloberfläche eine bestimmte elektrische Ladung befindet, so kann die nach außen gerichtete Wirkung dieser räumlich ausgedehnten Ladung durch eine punktförmig gedachte Ladung im Mittelpunkt der Kugel ersetzt werden. Das Problem entspricht mathematisch dem analogen Fall bei der Gravitation.

Des Weiteren ist ein Hinweis zum Sprachgebrauch angebracht. In abgekürzter Ausdrucksweise wird auch an dieser Stelle von „elektrischen Ladungen“ gesprochen, obwohl „elektrisch geladene Körper“, also Ladungsträger, gemeint sind. Eine elektrische Ladung ist ein abstrakter Begriff, eine spezielle Eigenschaft eines Körpers, sie kann für sich allein nicht existieren (ebenso wenig wie die „Masse“ für sich allein bestehen kann). Da sich die obige Formulierung in der Fachwelt jedoch verbreitet hat, so wird sie auch hier mitunter im angesprochenen Sinn verwendet.

1.2 Eine weitere Größe zur Beschreibung des elektrischen Feldes – Die elektrische Verschiebungsdichte

Zur quantitativen Beschreibung des elektrischen Feldes wurde im vorausgegangenen Abschnitt der Begriff der elektrischen Feldstärke \vec{E} eingeführt. Diese Größe beruht wesentlich darauf, dass eine Folgeerscheinung des elektrischen Feldes zu dessen Quantifizierung herangezogen wird: Es wird die Kraft auf einen in das Feld eingebrachten Probekörper gemessen. Es ist jedoch auch ein anderer Weg möglich: Man betrachtet nicht die Folge des elektrischen Feldes, sondern man stellt die Frage nach dessen Erzeugung. Die Problemfrage lautet also:

Wie kann man ein elektrisches Feld erzeugen,
und wie kann man daraus eine Möglichkeit
zur Messung des Feldes herleiten?

Zur Beantwortung dieser Frage sollen hier zwei Verfahrensweisen vorgestellt werden, eine experimentelle und eine mehr theoretisch orientierte. Die experimentelle Methode stützt sich auf das Phänomen der Influenz, die theoretische auf das Coulomb'sche Gesetz. Beide Wege führen zum Begriff der elektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} .

a) Der Zugang zur Größe \vec{D} über das Phänomen der Influenz

Das Phänomen der Influenz wurde bereits in einem früheren Abschnitt angesprochen. Die zentrale Aussage besteht darin, dass bewegliche Träger elektrischer Ladungen unter dem Einfluss eines von außen wirkenden Feldes getrennt werden. Quantitative Aussagen erhält man, wenn in das homogene elektrische Feld eines Plattenkondensators ein kleines, aneinander gefügtes Plattenpaar aus Metall (an je einem isolierten Stiel) eingebracht, dann dieses Plattenpaar im Feld des Kondensators getrennt und schließlich aus diesem herausgeführt wird. Man erhält die folgenden experimentellen Ergebnisse:

- Ergebnis 1: Der Raum zwischen dem im Feld des Kondensators befindlichen Influenzplattenpaar ist feldfrei.
- Ergebnis 2: Die Ladungsdichte Q/A ist auf dem Kondensator und auf den Influenzplatten gleich groß.
- Ergebnis 3: Die Ladungsdichte Q/A auf den Influenzplatten wächst proportional mit der Feldstärke des die Influenz verursachenden elektrischen Feldes.

An dieser Stelle kann man eine – zunächst begrenzt auf den Sonderfall des Plattenkondensators – neue physikalische Größe einführen, nämlich die elektrische Verschiebungsdichte \vec{D} und diese wie folgt definieren:

$$\text{El. Verschiebungsdichte} = \frac{\text{Ladung auf den Kondensatorplatten}}{\text{Fläche der Kondensatorplatten}}$$

$$|\vec{D}| = (Q / A) .$$

Die Einheit dieser Größe im SI-System ist C m^{-2} .

Fasst man die genannten experimentellen Ergebnisse zusammen, so lässt sich folgendes sagen: Die Größe \vec{D} beschreibt in quantitativer Weise die Entstehung des elektrischen Feldes und sie hängt direkt mit der elektrischen Feldstärke zusammen, beide Größen sind (im Vakuum) einander proportional. Es gilt der Zusammenhang:

$$\vec{D} = \text{const.} \cdot \vec{E} .$$

Für die Konstante findet man experimentell den Wert:

$$\text{const.} = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} .$$

Weitergehende Untersuchungen zeigen, dass dieser Wert mit der physikalischen Konstanten ϵ_0 übereinstimmt; es handelt sich dabei um jene Konstante, die bei der Formulierung des Coulomb'schen Gesetzes eingeführt worden war. Für den Zusammenhang zwischen der elektrischen Verschiebungsdichte

\vec{D} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} ergibt sich damit (im Vakuum) der Zusammenhang

$$\boxed{\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} .}$$

Aus den vorausgegangenen Darlegungen wird ersichtlich, dass die Konstante ϵ_0 neben der Bezeichnung „elektrische Feldkonstante“ auch den Namen „elektrische Influenzkonstante“ führt.

Eine Folge der geschilderten Betrachtungsweise ist es, dass es sich bei der elektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} um eine vektorielle Größe handelt, welche der elektrischen Feldstärke parallel gerichtet ist. Dieser Tatbestand ist erfüllt, sofern sich zwischen den Platten des Plattenkondensators ein isotropes Medium befindet, was im schulischen Bereich in der Regel stets der Fall ist. Ausnahmen treten dann auf, wenn es sich bei dem Medium um einen anisotropen Kristall handelt. In diesem Fall sind die Größen \vec{D} und \vec{E} nicht mehr parallel gerichtet.

b) Der Zugang zur Größe \vec{D} über das Coulomb'sche Gesetz

Die vorausgegangene Betrachtungsweise zur Einführung des Begriffes der elektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} ging von dem Phänomen der Influenz aus. Ein anderer Weg stützt sich auf das Coulomb'sche Gesetz und soll nachfolgend beschrieben werden. Man wählt zwei punktförmige Gebilde mit den elektrischen Ladungen $+Q$ und $+q$ im Abstand r und erhält nach Coulomb für die zwischen diesen „punktförmigen Ladungen“ wirkende Kraft:

$$|\vec{F}| = (1 / 4\pi\epsilon_0) \cdot (Q q / r^2) .$$

Man kann sich jetzt diesen idealisierten Sachverhalt anders, und zwar wie folgt, vorstellen: Die Ladung $+Q$ soll gleichmäßig auf eine Kugel vom Radius r verteilt werden. In diesem Fall lässt sich zeigen, dass die Coulomb - Kraft, welche von einer auf diese Weise verteilten Ladung ausgeht, genau so groß ist als wenn die Ladung punktförmig im Kugelmittelpunkt sitzen würde.

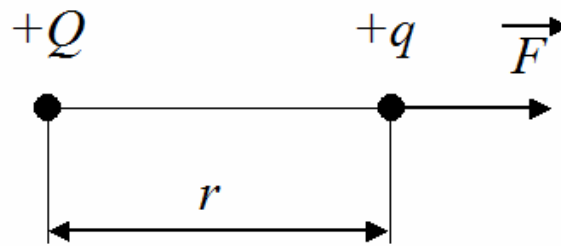
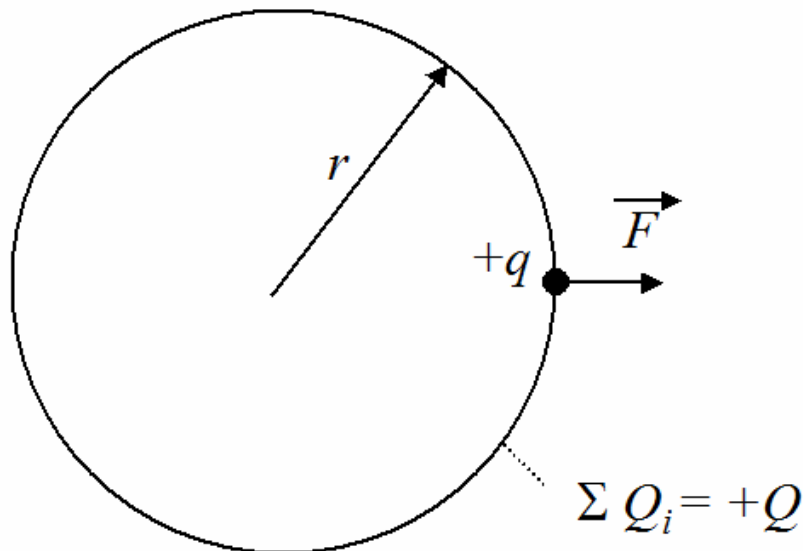
Fall 1: Ladung $+Q$ punktförmigFall 2: Ladung $+Q$ sphärisch

Abb. 3.1.3: Nach dem Coulomb'schen Gesetz übt eine felderzeugende punktförmige Ladung $+Q$ auf eine zweite punktförmige Ladung $+q$ im Abstand r die Kraft \vec{F} aus (Bild oben). Ist jedoch die felderzeugende Ladung $+Q$ auf die Oberfläche einer Kugel vom Radius r gleichmäßig verteilt und befindet sich die punktförmige Ladung $+q$ ebenfalls auf der Kugeloberfläche, so liegt eine komplizierte Situation vor (Bild unten). Es lässt sich zeigen, dass in beiden Fällen die wirkenden Coulomb'schen Kräfte gleich groß sind. Ziel der Betrachtung ist die Herleitung eines Zusammenhanges zwischen der el. Feldstärke und der Verschiebungsdichte.

In Gedanken bringen wir jetzt auf die Kugeloberfläche zusätzlich die zweite Ladung $+q$ auf und stellen die Frage nach der auf diese Ladung gemäß dem Coulomb'schen Gesetz wirkenden Kraft. Es gilt auch in diesem Fall die oben genannte Gleichung, die wir jetzt etwas anders schreiben:

$$|\vec{F}| = (1 / \epsilon_0) \cdot (Q / 4\pi r^2) \cdot q .$$

Die Größe $(Q / 4\pi r^2)$ ist die homogene Ladungsdichte (Q / A) auf der betrachteten Kugeloberfläche, sie wird als neue physikalische Größe „elektrische Verschiebungsdichte \vec{D} “ eingeführt, es gilt die allgemeine Festlegung:

$$|\vec{D}| = Q / A .$$

Die Gleichung für die wirkende Coulomb – Kraft erhält dann folgende Form:

$$|\vec{F}| = (1 / \epsilon_0) \cdot (|\vec{D}|) \cdot q .$$

Drückt man die wirkende Kraft in der früher hergeleiteten Weise mit Hilfe der elektrischen Feldstärke \vec{E} aus, so gilt:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q .$$

Die Zusammenfassung der beiden Gleichungen für die wirkende Coulomb – Kraft liefert (gültig für das Vakuum) das Ergebnis:

$$(1 / \epsilon_0) \cdot \vec{D} = \vec{E}$$

$$\boxed{\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} .}$$

Die Betrachtung ergibt einen Zusammenhang für die beiden Größen „elektrische Feldstärke“ und „elektrische Verschiebungsdichte“. Das Ergebnis – hier basierend auf dem Coulomb'schen Gesetz – stimmt überein mit den Schlussfolgerungen, welche aus dem Phänomen der Influenz gezogen wurden.

Anmerkung

Auf den ersten Blick mag es unnötig erscheinen zur quantitativen Beschreibung des elektrischen Feldes zwei Größen (die elektrische Feldstärke und die elektrische Verschiebungsdichte) heran zu ziehen - noch dazu, wenn beide durch die obige Gleichung über die elektrische Feldkonstante eng mit einander verbunden sind. Die Begründung liegt darin, dass von zwei unterschiedlichen Betrachtungsweisen des elektrischen Feldes ausgegangen wird: Nämlich zum einen von der Entstehung des elektrischen Feldes durch ruhende elektrische Ladungen (charakterisiert durch die elektrische Verschiebungsdichte \vec{D}), und zum anderen von der Wirkung des elektrischen Feldes auf einen eingebrachten Probekörper (charakterisiert durch die elektrische Feldstärke \vec{E}). Für die Lösung konkreter Probleme ist der obige Zusammenhang zwischen den beiden Feldgrößen in vielen Fällen sehr hilfreich, so z.B. bei der Berechnung der Feldstärke \vec{E} außerhalb einer geladenen Kugel. Ist die Ladung auf der Kugel bekannt, so ist damit die Verschiebungsdichte \vec{D} (als Quotient Q / A) gegeben und mit der obigen Beziehung auch die elektrische Feldstärke \vec{E} .

Ergänzung

Aus den Ergebnissen über die Untersuchungen der elektrischen Influenz kann der Schluss gezogen werden, dass bei einem Körper im elektrisch neutralen Zustand beide Ladungsarten in gleicher Menge vorhanden sind, dass sich diese unterschiedlichen Ladungsarten in ihrer Wirkung nach außen kompensieren und die Erscheinung der Influenz lediglich eine Ladungstrennung bedeutet. Bei elektrischen Leitern (welche durch die leichte Verschiebbarkeit der Träger elektrischer Ladungen charakterisiert sind) folgt weiter, dass die elektrischen Feldlinien auf der Leiteroberfläche senkrecht stehen müssen, da bei schräg auf die Leiteroberfläche wirkenden elektrischen Kräften die beweglichen Ladungsträger so lange verschoben werden, bis keine Tangentialkräfte mehr auftreten. Weiter bewirken die elektrischen

Feldkräfte, dass sich die beweglichen Ladungsträger eines Leiters unter dem Einfluss des Feldes an die Leiteroberfläche begeben, was zur Folge hat, dass das Innere eines elektrischen Leiters feldfrei ist.

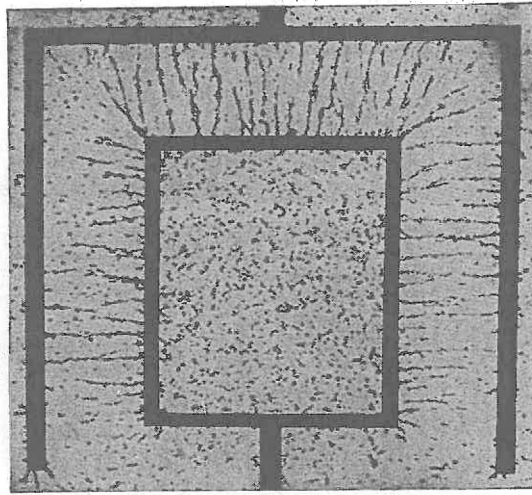


Abb. 3.1.4: Zur Demonstration der feldabschirmenden Wirkung eines Gehäuses aus Metall (nach Frauenfelder/Huber).
Wird ein geschlossenes metallisches Gehäuse in ein elektrisches Feld gebracht, so ist das Innere des Gehäuses feldfrei. Der Effekt kann zurück geführt werden auf das Phänomen der Influenz und auf die in einem Metall vorhandenen frei beweglichen Träger von elektrischen Ladungen (vgl. Anhang).

Dieser wichtige Tatbestand kann zur Abschirmung elektrischer Felder ausgenutzt werden, so z. B. bei abgeschirmten Kabeln. Eine weitere Anwendung dieser Art ist der Faraday'sche Käfig - ein Metallgehäuse aus Stäben oder Drahtgeflecht, welches einen im Inneren befindlichen Menschen selbst vor Blitzeinwirkung schützt. Auf die entsprechenden, sehr eindrucksvollen Versuche (z.B. im Deutschen Museum in München) sei verwiesen.

2. Das Magnetfeld – eine Folge strömender Träger elektrischer Ladungen

Beim Magnetismus handelt es sich um ein Phänomen, welches uns in der Natur beim Magneteisenstein und im Magnetfeld der Erde gegenübertritt. In Europa bestanden diese Kenntnisse bereits in der Antike, in China kannte man um Christi Geburt den Kompass. Untersuchungen im Mittelalter von Petrus PEREGRINUS („De magnete“, 1269) zeigten, dass ein Stabmagnet beim Zerkleinern wieder in kleine Magnete zerfällt, ein Hinweis auf das Fehlen magnetischer Monopole. Spätere Arbeiten von William GILBERT (um 1600) und Otto von GUERICKE (um 1650) ergaben Kenntnisse über die Herstellung künstlicher Magnete und über Deklination und Inklination des Erdmagnetfeldes. Einen Höhepunkt der Entwicklung stellen die von James Clerk MAXWELL erstmals 1862 im Philosophical Magazine unter dem Titel „On Physical Lines of Force“ veröffentlichten Gleichungen dar, welche magnetische und elektrische Felder miteinander verknüpfen.

Zur Herstellung von Magnetfeldern gibt es prinzipiell zwei Methoden, nämlich durch bewegte elektrische Ladungen und durch sich im Laufe der Zeit ändernde elektrische Felder, was den engen Zusammenhang zwischen magnetischen und elektrischen Erscheinungen sichtbar werden lässt. Die Verknüpfung von sich zeitlich ändernden elektrischen und magnetischen Feldern führt zur Entstehung elektromagnetischer Wellen, welche im Jahre 1888 von Heinrich HERTZ experimentell nachgewiesen werden konnten und später von Guglielmo MARCONI (1874 - 1937) im technischen Maßstab zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung entwickelt wurden.

Ein besonderes Problem stellt die quantitative theoretische und experimentelle Beschreibung von Magnetfeldern dar. Ein auf dem Coulomb'schen Gesetz der Magnetostatik beruhender, der begrifflichen Erfassung der elektrischen Ladung und des

elektrisches Feldes analoger Weg, ist wegen der Verknüpfung des Magnetismus mit der Elektrizitätslehre (und der sich daraus ergebenden Folgerung, welche den Magnetismus als Teil der Elektrizität betrachtet), nicht möglich. Einen Weg zur Beschreibung der Stärke eines Magnetfeldes bietet die Kraft auf quer zum Magnetfeld bewegte elektrische Ladungsträger, also die Lorentzkraft. Ein anderer Weg führt über die elektromagnetische Induktion. Dabei wird in einer Spule, die von außen in das zu messende Magnetfeld eingebracht wird, ein Spannungsstoß induziert; aus diesem Spannungsstoß kann eine Aussage über die Größe des bestehenden Magnetfeldes abgeleitet werden.

2.1 Anmerkungen zur Magnetostatik

Bei der geschichtlichen Entwicklung der Elektrostatik bereitete die Begriffsbildung große Schwierigkeiten. So sprach man zunächst von einem „elektrischen Fluidum“, welches später im Coulomb'schen Gesetz (1786) zum Begriff der elektrischen Ladung führte. In Analogie dazu sah man bei Permanentmagneten ein „magnetisches Fluidum“, eine Vorstellung, welche in der noch heute gebräuchlichen Größe des „magnetischen Flusses Φ “ zu erkennen ist. Dieser magnetische Fluss soll die „Stärke des Magneten“ beschreiben; bildlich gesprochen kann man sich darunter eine bestimmte „Menge“ oder „Portion von Magnetismus“ (oder „Magnetizität“ analog zur „Elektrizität“) vorstellen. Den magnetischen Fluss Φ könnte man auch als „magnetische Ladung“ - z.B. eines Permanentmagneten - bezeichnen. Die Analogie tritt auch in den Maßeinheiten des SI – Systems zu Tage, in welchem die elektrische Ladung in As und der magnetische Fluss in Vs gemessen werden.

Entsprechend dem Coulomb'schen Gesetz der Elektrostatik gibt es auch ein Coulomb'sches Gesetz für die Magnetostatik, welches die Kraft zwischen zwei Magnetpolen beschreibt.

Es gilt:

$$|\vec{F}| = \text{const.} \frac{\Phi_1 \cdot \Phi_2}{r^2} .$$

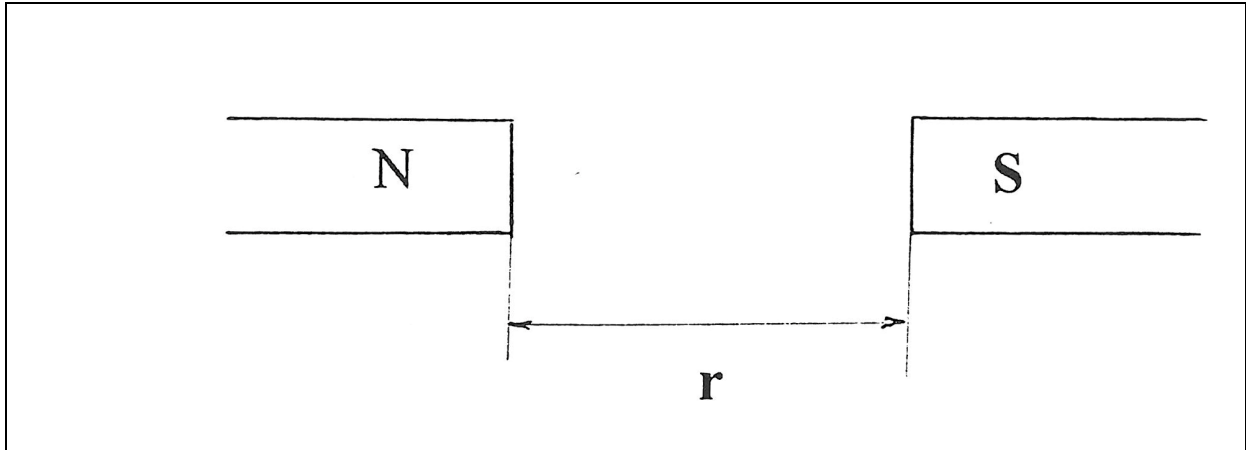


Abb. 3.2.1: Zur Beschreibung der Kraft zwischen den Polen eines Dauermagneten dient der Begriff des „magnetischen Flusses“ Φ , welcher dem Begriff der elektrischen Ladung in der Elektrizitätslehre entspricht. Für die wirkende Kraft gilt das von Coulomb gefundene Gesetz, welches formal dem Gesetz für die Kraft zwischen elektrischen Ladungen gleicht.

Dieser mathematische Zusammenhang entspricht demjenigen in der Elektrostatik. Das Problem der Messung des magnetischen Flusses Φ könnte analog zur Messung der elektrischen Ladung gelöst werden. Man könnte festlegen, dass die Einheit des magnetischen Flusses dann vorliegt, wenn zwischen zwei gleichen Magnetpolen in einem bestimmten Abstand eine bestimmte Kraft wirkt. Die Konstante in diesem Gesetz wäre dann ebenfalls festgelegt. Eine solche Vorgehensweise setzt allerdings voraus, dass die Magnetostatik als eigenständiges Teilgebiet der Physik angesehen werden kann, was bei dieser Betrachtungsweise durch die Einführung einer eigenen Grundgröße für den Magnetismus zum Ausdruck käme - entsprechend der Einführung

der Grundgröße „elektrische Ladung“ für die Elektrizitätslehre. Da aber seit dem Versuch von Oersted (1820) bekannt ist, dass magnetische Phänomene auf elektrische Vorgänge zurückgeführt werden können, so ist es angebracht, den Magnetismus nicht als selbständiges Gebiet der Physik, sondern als Teilgebiet der Elektrizitätslehre zu betrachten. Für das Coulomb'sche Gesetz der Magnetostatik bedeutet dies, dass im Bereich der Elektrizitätslehre nach Messmöglichkeiten für den magnetischen Fluss gesucht werden muss. Eine Möglichkeit dazu bietet die Erscheinung der elektromagnetischen Induktion. Mit der dort auftretenden Konstanten μ_0 , der Induktionskonstanten, lässt sich die Kraft zwischen zwei Magnetpolen eines Dauermagneten wie folgt schreiben:

$$|\vec{F}| = \frac{1}{4 \pi \mu_0} \cdot \frac{\Phi_1 \cdot \Phi_2}{r^2} .$$

Die Schreibweise lässt die Analogie zum entsprechenden Fall der Elektrostatik sichtbar werden.

2.2 Der Grundversuch

Ein zentrales Problem, welches sich bei der Behandlung des Magnetismus stellt, ist die Frage, wie ein Magnetfeld gemessen werden kann. Einen Hinweis auf eine mögliche Lösung bietet der Versuch von Oersted, welcher aussagt, dass ein Strom elektrischer Ladungsträger von einem Magnetfeld begleitet ist und dass dieses Magnetfeld auf eine Magnetnadel - also auf einen Dauermagneten - eine Kraft ausübt. Diesen Tatbestand kann man mit anderen Worten auch folgendermaßen formulieren: Ein stromdurchflossener Leiter ist ein Magnet, und dieser Magnet übt auf einen anderen Magneten (nämlich eine Magnetnadel) eine Kraft aus. An dieser Stelle lässt sich eine begründete Vermutung aufstellen, denn wenn der eine Magnet auf den anderen eine Kraft

ausübt, so müsste nach dem Reaktionsprinzip von dem zweiten Magneten auf den ersten ebenfalls eine Kraft wirken. Damit kann man die Vermutung aufstellen:

Ein Dauermagnet (bzw. ein Magnetfeld)
müsste auf einen stromdurchflossenen Leiter
eine Kraft ausüben.

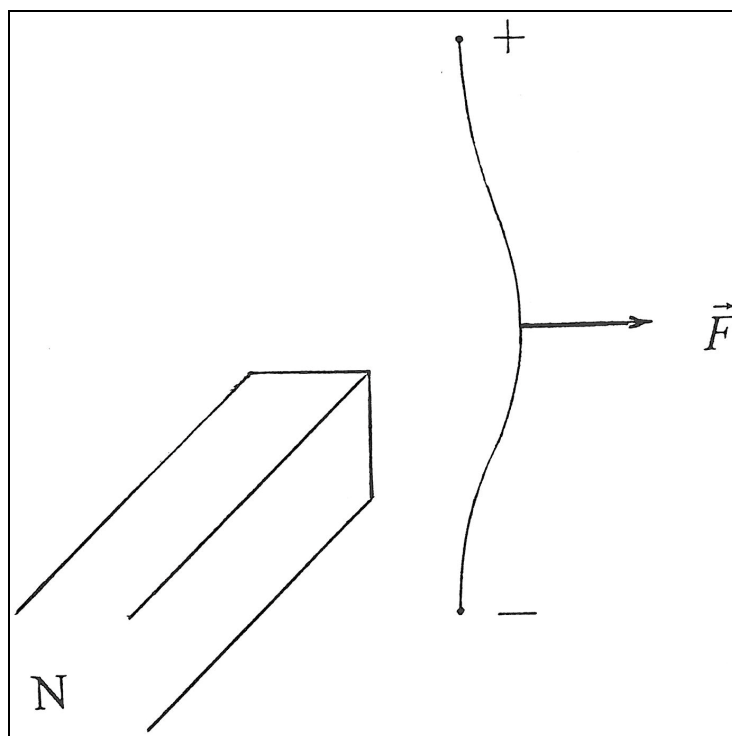


Abb. 3.2.2: Zur Demonstration der Kraft, welche von einem Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter ausgeübt wird.

Zur Prüfung dieser Vermutung verwendet man ein lose aufgehängtes, sehr biegsames Metallband; dieses darf nicht aus einem magnetisierbaren Material bestehen, da sonst der Magnet darauf eine Kraft ausüben würde, so wie ein Magnet beispielsweise einen Körper aus Eisen anzieht. Folglich wäre eine Prüfung der vorgestellten Vermutung nicht möglich. Für den

Versuch geeignet ist ein Band aus Aluminium (ein Lamettafaden) durch welches ein Strom von mehreren Ampere fließt. Diesem Band nähert man die Stirnseite eines Stabmagneten. Als Ergebnis stellt man fest, dass auf das Metallband eine Kraft wirkt, welche senkrecht zur Achse des Stabmagneten und senkrecht zur Orientierung des Metallbandes gerichtet ist. Die Richtung der Kraft kehrt sich um, wenn sich die Stromrichtung oder die Richtung des Magnetfeldes umkehrt.

Der Versuch zeigt das grundsätzliche Phänomen, der Effekt selbst ist nicht sehr groß. Darüber hinaus besitzt der Versuch aber noch einen wesentlichen didaktischen Vorzug: Die Versuchsanordnung lässt das Ergebnis offen, die Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter kann sich weitgehend frei einstellen, der Zusammenhang zwischen den beteiligten physikalischen Größen muss gesucht und entdeckt werden. Erst wenn dies geschehen ist, kann man nach einer Apparatur Ausschau halten, welche den fraglichen Zusammenhang deutlicher zeigt. Eine solche Anordnung ist die zwischen den Schenkeln eines Hufeisenmagneten angebrachte Leiterschaukel. Mit ihr kann das Ergebnis nochmals verdeutlicht werden:

- Die auf den stromdurchflossenen Leiter wirkende Kraft steht senkrecht zum Leiter und senkrecht zum Magnetfeld.
- Die Kraft ist proportional zur Stromstärke und zur vom Magnetfeld durchsetzten Leiterlänge.
- Die Kraft ist um so größer, je „stärker“ der Magnet ist.

Die qualitative Deutung des beschriebenen Effektes bereitet keine Schwierigkeiten, wenn man den stromdurchflossenen Leiter - nach dem Oerstedschen Versuch - als Magnet ansieht und die Erscheinung analog zur Magnetostatik als Kraft zwischen zwei Magneten beschreibt. Schwieriger ist eine Herleitung der Richtung der auf den Leiter ausgeübten Kraft. Die Überlagerung der Magnetfelder des Dauermagneten und des stromdurchflossenen Leiters liefern Erklärungsmöglichkeiten.

Betrachtet man beide Magnetfelder getrennt, so kann man auf die Erkenntnisse der Magnetostatik zurückgreifen und sagen, dass bei parallel gerichteten Magnetfeldern Abstoßung und bei entgegengesetzt gerichteten Feldern Anziehung auftritt. Eine Betrachtung der Feldrichtung zu beiden Seiten des Leiters liefert dann als Ergebnis die Richtung der Kraft. Geht man von dem Feldlinienbild des resultierenden Magnetfeldes aus, so ist das Feld dort besonders stark, wo die Feldliniendichte groß ist. Aus dem Feldlinienbild kann man entnehmen, dass der Leiter aus dem Gebiet des starken Magnetfeldes herausgedrängt wird.

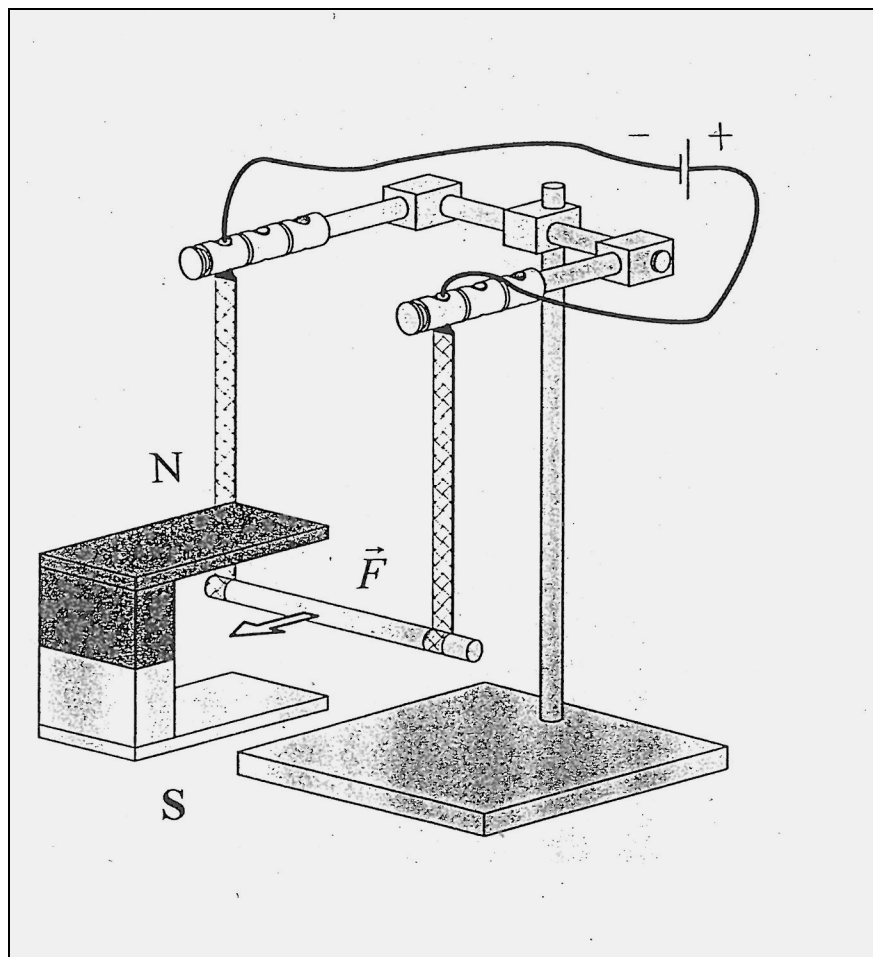


Abb. 3.2.3: Die stromdurchflossene Leiterschaukel zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten zeigt die Lage der Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter bezüglich Stromrichtung und Magnetfeld.

Wesentlich an dem beschriebenen Versuch ist die Folgerung, welche aus dem beschriebenen Phänomen gezogen werden kann, denn es eröffnet sich hier eine Messmöglichkeit für das Magnetfeld. Die auf den stromdurchflossenen Leiter wirkende Kraft ist proportional zur Stromstärke (durch den Leiter) und zur vom Magnetfeld durchsetzten Leiterlänge, was mit den hier aufgezeigten Möglichkeiten quantitativ bestätigt werden kann. Der Zusammenhang mit der Stärke des Magnetfeldes lässt sich an dieser Stelle der Begriffsentwicklung nur qualitativ angeben, wenn - wie hier beabsichtigt - das Phänomen zur Messung des Magnetfeldes herangezogen werden soll.

2.3 Quantitative Erfassung eines Magnetfeldes

Um eine Messmöglichkeit für das Magnetfeld zu finden soll an die Vorgehensweise bei der Messung des elektrischen Feldes erinnert werden. Die Messung der elektrischen Feldstärke \vec{E} beruht darauf, dass man einen Probekörper in das Feld einbringt und die Kraft auf diesen Probekörper ermittelt; dann wird diese Kraft durch die für den Probekörper charakteristische Eigenschaft (charakteristisch bezüglich des zu messenden Feldes) dividiert. Allgemein ergibt sich:

$$\text{Feldstärke} = \frac{\text{Kraft auf Probekörper}}{\text{charakteristische Eigenschaft des Probekörpers}} .$$

Soll diese Vorgehensweise auf die Messung des Magnetfeldes übertragen werden, so stellt sich die Frage nach dem Probekörper und dessen charakteristischen Eigenschaften. Aus dem Grundversuch kann geschlossen werden, dass als Probekörper (PK) ein gerader stromdurchflossener Leiter in Frage kommen kann. Die charakteristischen Merkmale dieses Probekörpers in Bezug auf das zu messende Magnetfeld sind die Länge l_{PK} des Leiters (soweit er vom Magnetfeld durchsetzt wird) und die

Stromstärke \vec{I}_{PK} durch den Leiter. Somit folgt für die zu messende Größe des Magnetfeldes, welche man als „magnetische Flussdichte \vec{B} “ bezeichnet:

$$\text{Magnet. Flussdichte} = \frac{\text{Kraft auf Probekörper}}{\text{Stromstärke durch PK} \cdot \text{Länge des PK}}$$

$$|\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{|\vec{I}_{\text{PK}}| \cdot l_{\text{PK}}} .$$

Als Einheit für die magnetische Flussdichte ergibt sich zunächst $\text{N A}^{-1} \text{m}^{-1}$. Erweitert man diesen Bruch mit der Einheit der Länge (m) und berücksichtigt man die Definition der Einheit der Spannung ($1 \text{ V} = 1 \text{ J C}^{-1}$), so ergibt sich die Einheit V s m^{-2} , welche zu Ehren von Nicola TESLA (1846 - 1943) auch als 1 T geschrieben wird.

Die Bezeichnung „magnetische Flussdichte“ (verbunden mit der Einheit V s m^{-2}) weist darauf hin, dass hier eine andere magnetische Größe auf die Flächeneinheit bezogen wird. Diese andere Größe, gemessen in Vs, wird „magnetischer Fluss Φ “ genannt, welcher - stark vereinfacht - als gesamte in einem Magnetfeld vorhandene „Menge an Magnetismus“ (oder in Anlehnung zum elektrischen Fall als „Menge an Magnetizität“) bezeichnet werden kann. Der Begriff des magnetischen Flusses ist das Analogon zum Begriff der elektrischen Ladung auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre. So wie die elektrische Ladung zunächst als „elektrisches Fluidum“ angesehen wurde, so wurde im Fall des Magnetfeldes das „magnetische Fluidum“ zur Beschreibung der Phänomene herangezogen. Die Analogie ist an den Maßeinheiten ersichtlich: Die elektrische Ladung wird in As gemessen, der magnetische Fluss in Vs.

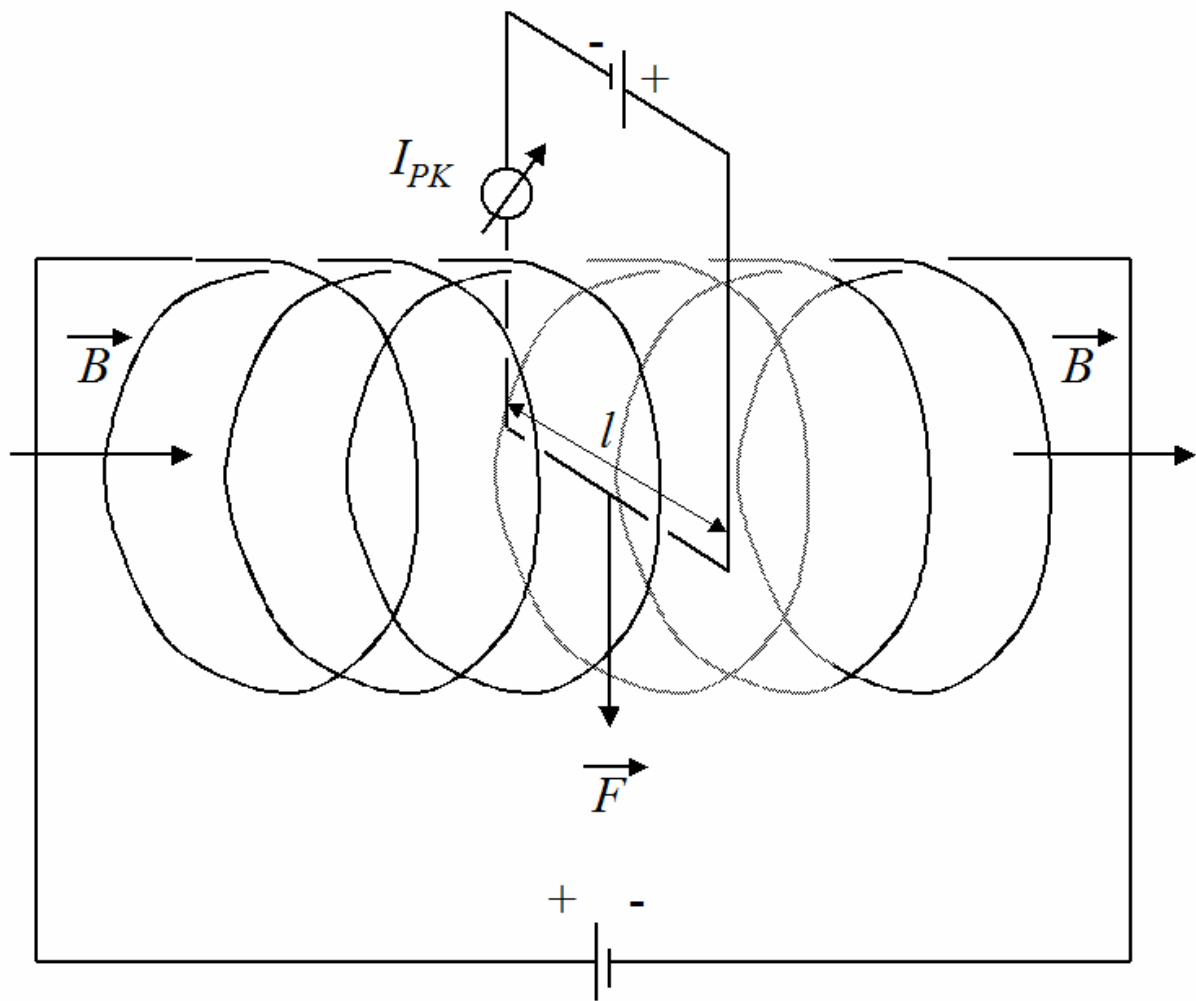


Abb. 3.2.4: Zur Messung der magnetischen Flussdichte \vec{B} mit Hilfe der auf den Probekörper wirkenden Kraft \vec{F} .

Versuchsdaten: $l_{PK} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$; $|\vec{I}_{PK}| = 50 \text{ A}$;
 $|\vec{F}| = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ N}$.

Daraus ergibt sich für die Flussdichte der Wert:
 $|\vec{B}| = 14,0 \cdot 10^{-3} \text{ V s m}^{-2}$.

Die große Stromstärke durch den Probekörper wird dadurch erreicht, dass statt eines einzigen Leiters 50 parallel liegende Drähte verwendet werden, welche auf einem Rahmen aufgewickelt sind. Dadurch erhält man einen Verstärkungseffekt, so dass in einem einzigen Draht nur eine Stromstärke von 1 A fließen muss, was versuchstechnisch von großer Bedeutung ist.

Entsprechend kann festgelegt werden:

$$\Phi = |\vec{B}| \cdot A, \quad \text{bzw.}$$

$$|\vec{B}| = \Phi / A.$$

(Φ = magnetischer Fluss; $|\vec{B}|$ = magnetische Flussdichte; A = vom magnetischen Fluss durchsetzte Fläche).

Die obige Gleichung diene zunächst als Definition für die zu messende magnetische Flussdichte \vec{B} . Ist diese eingeführt, so kann die Gleichung auch umgeschrieben und nach der Kraft \vec{F} aufgelöst werden. Berücksichtigt man die Richtung der dabei beteiligten vektoriellen Größen, so ergibt sich:

$$\vec{F} = l_{\text{PK}} \cdot (\vec{I}_{\text{PK}} \times \vec{B}).$$

Dabei ist \vec{I}_{PK} die Stromstärke elektrisch positiver Ladungsträger, sie wird in diesem Zusammenhang als vektorielle Größe aufgefasst; die Richtung des Vektors ist die der diesbezüglichen Strömung. Die Gleichung besagt, dass in einem Magnetfeld eine Kraft auf die Träger elektrischer Ladungen ausgeübt wird, wenn sich diese quer zum Magnetfeld bewegen.

2.4 Eine weitere Größe zur Beschreibung des Magnetfeldes – Die magnetische Feldstärke \vec{H}

Aus dem Versuch von Oersted geht hervor, dass ein Magnetfeld die Folge eines elektrischen Ladungsträgerstromes ist. Folglich muss die Entstehung eines Magnetfeldes im Prinzip auch für einen einzigen bewegten Ladungsträger gelten. Die Zusammenhänge wurden nach Vorarbeiten von LaPlace durch

Biot und Savart untersucht und bereits 1820 erfolgreich abgeschlossen. Die Untersuchungen führten zu dem folgenden Ergebnis:

$$\vec{H} = \frac{Q}{4\pi r^2} \cdot \frac{\vec{v} \times \vec{r}}{|\vec{r}|} .$$

Der wesentliche Inhalt dieser Beziehung besteht darin, dass zur Beschreibung eines Magnetfeldes eine neue Größe eingeführt wird, nämlich die magnetische Feldstärke \vec{H} . Damit wird die Entstehung eines Magnetfeldes auf das Strömen von Trägern elektrischer Ladungen zurück geführt. In der genannten Gleichung bedeutet Q die Größe der bewegten Ladung einschließlich des Vorzeichens, \vec{v} die Geschwindigkeit des Ladungsträgers, \vec{r} ist zu jedem Zeitpunkt der Radiusvektor vom Ladungsträger zum Aufpunkt, in welchem die neu eingeführte Größe - die magnetische Feldstärke \vec{H} - auftritt.

Die Gleichung lässt sich umformen, so dass bei einer großen Zahl von Trägern elektrischer Ladungen statt der Ladungsträger und ihrer Geschwindigkeit die Stromstärke I auftritt. Nach Integration ergeben sich zwei wichtige Sonderfälle, nämlich der gerade stromdurchflossene Leiter und die lange Spule. Im ersten Fall gilt:

$$|\vec{H}_r| = \frac{I}{2\pi r} ,$$

d.h. im Abstand r von einem geraden Leiter, welcher von der Stromstärke I durchflossen wird, herrscht die magnetische Feldstärke $|\vec{H}_r|$. Im Fall einer langen Spule besitzt diese Größe den Wert

$$|\vec{H}| = \frac{n}{l} I ,$$

wobei n die Windungszahl und l die Länge der Spule bedeuten, I ist die Stromstärke durch die Spule.

Das Biot-Savartsche Gesetz fand seine abschließende mathematische Formulierung in der ersten Maxwell'schen Gleichung, dem sogenannten Durchflutungsgesetz (1862/1873). Nach Maxwell ist die Liniensumme über die magnetische Feldstärke \vec{H} längs einer Feldlinie gleich dem elektrischen Strom I , der das Magnetfeld erzeugt. Es gilt:

$$\oint \vec{H} \, d\vec{s} = I .$$

Bezieht man dies auf einen geraden stromdurchflossenen Leiter, so ist längs einer ringförmig geschlossenen Feldlinie zu integrieren. Es ergibt sich

$$|\vec{H}| \cdot 2\pi r = I ,$$

also die eben angeführte Beziehung für $|\vec{H}| = |\vec{H}_r|$.

Ergänzung 1

In der bisherigen Betrachtung wurden für die Beschreibung der Stärke des Magnetfeldes (womit nicht die magnetische Feldstärke \vec{H} gemeint ist, sondern nur qualitativ zum Ausdruck gebracht werden soll, wie „stark“ ein Magnetfeld ist) zwei physikalische Größen eingeführt, nämlich die magnetische Feldstärke \vec{H} und die magnetische Flussdichte \vec{B} . Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, ob dies erforderlich ist. Beschränkt man sich auf den Fall, dass eine eventuell in das Magnetfeld eingebrachte Materie isotrop ist, so genügt zur Beschreibung prinzipiell eine einzige Größe, in vielen Fällen wird die magnetische Flussdichte \vec{B} gewählt. In dem hier nicht weiter zu betrachtenden Fall, dass ein kristalliner ferromagnetischer Körper in das Magnetfeld eingeführt wird, ergibt sich eine Komplikation. Die Schwierigkeit besteht darin, dass der Kristall anisotrop aufgebaut ist; dies bedeutet, dass die ferromagnetischen Eigenschaften des Kristalls

von der Richtung im Raum abhängen. Als Folge davon sind die beiden Größen \vec{H} und \vec{B} nicht mehr parallel gerichtet, da ihre mathematische Verknüpfung durch eine Matrix von neun Elementen gegeben ist. Im Bereich der Sekundarstufe I tritt diese Schwierigkeit nicht auf, hier betrachtet man isotrope Körper, die beiden Größen \vec{H} und \vec{B} unterscheiden sich lediglich durch einen konstanten Faktor. Dies bedeutet, dass in dem hier angesprochenen schulischen Bereich zur Beschreibung des Magnetfeldes die Benutzung von zwei Größen nicht unbedingt erforderlich ist. Trotzdem kann diese Vorgehensweise zur quantitativen Erfassung des Magnetfeldes zweckmäßig sein. Aus den vorangegangenen Überlegungen ergibt sich, dass ein vorhandenes Magnetfeld unter zwei verschiedenen Aspekten betrachtet werden kann. Einmal wurde die Herstellung eines Magnetfeldes durch einen Ladungsträgerstrom untersucht, und hier wählte man als Feldgröße die magnetische Feldstärke \vec{H} . Im anderen Fall wurde die Art und Weise der Herstellung des Magnetfeldes außer Betracht gelassen, es ging um die Frage der Messung des Magnetfeldes mit Hilfe eines Probekörpers, und dies führte zur magnetischen Flussdichte \vec{B} . Beide Größen hängen - wie bereits erwähnt - miteinander zusammen. Für das Vakuum gilt:

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} .}$$

μ_0 ist die so genannte magnetische Feldkonstante oder Induktionskonstante und hat den Zahlenwert:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V s A}^{-1} \text{ m}^{-1} .$$

Eine prinzipielle Messmöglichkeit der Konstanten μ_0 ist mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetztes für den Magnetismus möglich (vgl. vorausgegangener Abschnitt). Dazu bestimmt man die Kraft zwischen zwei Magnetpolen, ihren Abstand r und deren magnetische Flussdichte \vec{B} (letztere beispielsweise mit dem hier geschilderten Verfahren oder anderen Messmethoden). Aus der magnetischen Flussdichte und den wirksamen Flächen der

Magnetpole ergeben sich dann die Größen für den magnetischen Fluss, woraus μ_0 bestimmt werden kann.

Die Einführung der beiden magnetischen Feldgrößen \vec{H} und \vec{B} kann analog gesehen werden zu den beiden elektrischen Feldgrößen \vec{D} und \vec{E} , welche sich ganz entsprechend auf die Entstehung des elektrischen Feldes durch ruhende elektrische Ladungen und auf die Messung des elektrischen Feldes durch die Kraft auf einen Probekörper beziehen. Des Weiteren sind die beiden elektrischen Feldgrößen auch direkt durch die elektrische Feldkonstante ϵ_0 miteinander verknüpft, genau so wie die beiden Größen zur Beschreibung des Magnetfeldes durch die magnetische Feldkonstante verbunden sind.

Ergänzung 2

Abschließend sei nochmals die Frage gestellt, welche Feldgrößen einander im elektrischen und magnetischen Fall entsprechen. Je nach der Ausgangslage der Fragestellung ergeben sich zwei unterschiedliche Antworten. Im einen Fall geht man von der hier vorgestellten Beschreibungsweise elektrischer und magnetischer Felder aus, im anderen Fall beruht die Antwort auf den Maxwell'schen Gleichungen.

Zunächst soll eine Antwort auf der Basis der in den voraus gegangenen Betrachtungen eingeführten Begriffe gesucht werden. Dabei müssen wir zwei Verfahrensweisen unterscheiden. Im einen Fall wurde die Frage gestellt, wie elektrische und magnetische Felder mit Hilfe eines geeigneten Probekörpers gemessen werden können. Im elektrischen Fall führte dieser Weg zum Begriff der elektrischen Feldstärke \vec{E} , im magnetischen Fall zur magnetischen Flussdichte \vec{B} . Unter diesem Aspekt gesehen entsprechen sich also die beiden Feldgrößen \vec{E} und \vec{B} . Im anderen Fall wurde die Frage nach der Herstellung der jeweiligen Felder gestellt. Die Antwort lautet: Ein elektrisches Feld kann man durch ruhende elektrische Ladungsträger erzeugen, ein Magnetfeld durch strömende Träger elektrischer Ladungen. Die

diesbezüglichen Untersuchungen führen im elektrischen Fall zur elektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} und im magnetischen Fall zur magnetischen Feldstärke \vec{H} . So betrachtet sind es also die beiden Größen \vec{D} und \vec{H} , die einander entsprechen.

Eine andere Antwort auf die Frage, welche Feldgrößen einander entsprechen ergibt sich dann, wenn wir unseren Blick auf die Maxwell'schen Gleichungen lenken. Der wesentliche Unterschied zwischen der bisher dargestellten Betrachtungsweise und den Maxwell'schen Gleichungen besteht in einer völlig unterschiedlichen Art und Weise der Herstellung dieser Felder. In der hier vorgestellten Betrachtungsweise wurden elektrische Felder durch ruhende und magnetische Felder durch strömende Träger elektrischer Ladungen erzeugt. Die Überlegungen von Maxwell beruhen auf grundlegend anderen Vorstellungen. Nach Maxwell kann ein elektrisches Feld dadurch hergestellt werden, dass sich ein Magnetfeld im Laufe der Zeit ändert. Entsprechend lässt sich ein Magnetfeld durch ein sich im Laufe der Zeit änderndes elektrisches Feld erzeugen.

Um eine Antwort auf die Frage zu finden, welche elektrischen und magnetischen Größen einander gemäß dieser Sichtweise entsprechen, gehen wir von der Elektrostatik und der Magnetostatik aus und untersuchen im SI – System die Maßeinheiten der betreffenden Größen. In der Elektrostatik wurde als Grundgröße die elektrische Ladung, gemessen in der Einheit „1 C“, eingeführt. Wirft man einen Blick auf die Elektrodynamik, so kann diese Einheit auch als „1 A s“ geschrieben werden. Bei der Magnetostatik ergibt sich – wie an anderer Stelle gezeigt wurde – als entsprechende Größe der magnetische Fluss Φ , gemessen in der Einheit „1 V s“. Überträgt man diese Betrachtungsweise auf die Maßeinheiten der anderen Feldgrößen, so ergibt sich das nachfolgende Bild.

Die elektrische Feldstärke \vec{E} wird gemessen in der Einheit „1 V m⁻¹“, die magnetische Feldstärke \vec{H} wird gemessen in der Einheit „1 A m⁻¹“.

Die elektrische Verschiebungsdichte \vec{D} wird gemessen in der Einheit „1 A s m⁻²“, die magnetische Flussdichte \vec{B} in der Einheit „1 V s m⁻²“.

Unter dem genannten Aspekt kann man zusammenfassend sagen: Der elektrischen Feldstärke \vec{E} entspricht im magnetischen Fall die magnetische Feldstärke \vec{H} , und der elektrischen Verschiebungsdichte \vec{D} entspricht im magnetischen Fall die Flussdichte \vec{B} . Die einander entsprechenden Feldgrößen kann man dadurch ermitteln, dass man bei den in Frage kommenden Begriffen die jeweiligen zusammengesetzten Maßeinheiten betrachtet und die darin enthaltenen Einheiten „Volt“ und „Ampere“ gegenseitig austauscht.

Die aufgezeigten Unterschiede in den beiden Betrachtungsweisen - des hier vorgestellten Weges und desjenigen nach Maxwell - mögen zunächst etwas erstaunen und vielleicht das Bild einer einheitlichen Begriffsbildung bei elektrischen und magnetischen Feldern stören. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass Heinrich HERTZ (1857 – 1894) den Maxwell'schen Gleichungen eine höchst vollendete mathematische Form gegeben hat, so dass das Bild einer harmonischen Begriffsbildung nicht getrübt ist.

2.5 Die Lorentz – Kraft

In den vorangegangenen Betrachtungen hatten wir gesehen, dass im Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter eine Kraft ausgeübt wird. Es gilt:

$$\vec{F} = l \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) ,$$

wobei l die Länge des vom Magnetfeld durchsetzten Leiterstückes, \vec{I} die Stromstärke unter Berücksichtigung eines positiven Ladungsträgerstromes und \vec{B} die Flussdichte des Magnetfeldes bedeuten. Die Beziehung gilt zunächst für ein Leiterstück aus festem Material. Es ist jedoch zu vermuten, dass auch auf freie Ladungsträger eine Kraft wirkt.

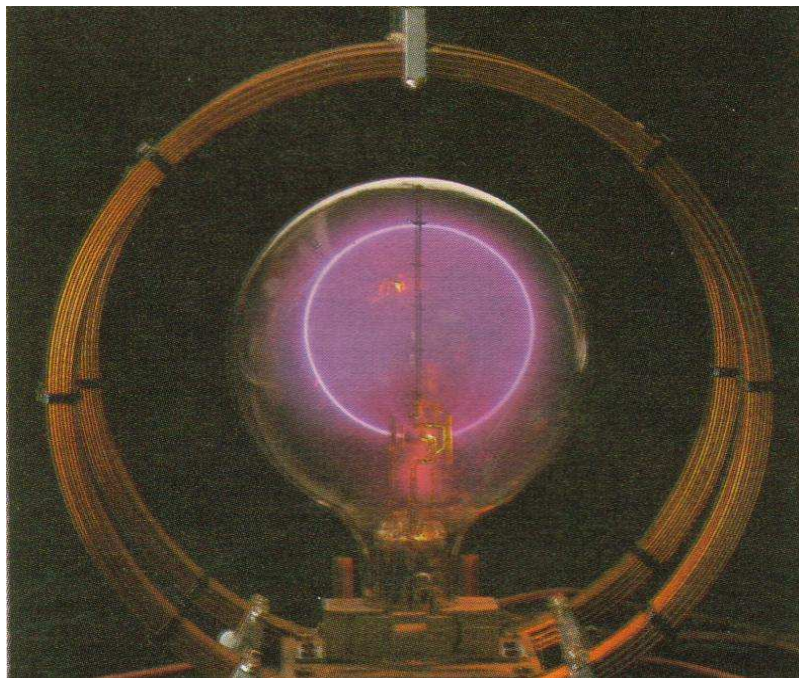
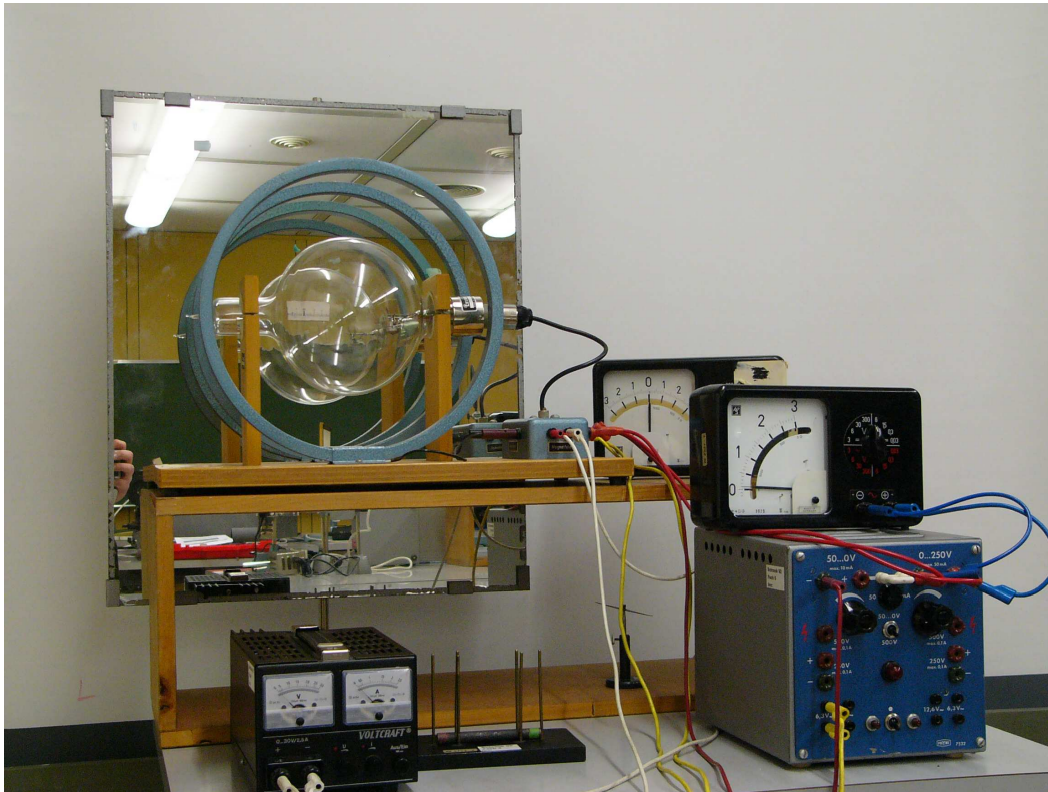


Abb. 3.2.5: Fadenstrahlrohr zur Demonstration der Lorentz-Kraft. Das Helmholtz-Spulenpaar erzeugt in dem Glaskolben ein homogenes Magnetfeld, und dadurch werden die Elektronen von der Lorentz-Kraft auf eine Kreisbahn gezwungen.

Voraussetzung ist, dass sich diese Träger elektrischer Ladungen quer zum Magnetfeld bewegen. Ist die Anzahl der Ladungsträger N , die elektrische Ladung eines einzelnen Ladungsträgers q und seine Geschwindigkeit \vec{v} , so folgt:

$$I = (N q / l) \cdot |\vec{v}| \dots$$

Bei einem einzigen Ladungsträger der Ladung q ergibt sich für die vom Magnetfeld ausgeübte Kraft

$$\boxed{\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).}$$

An dieser Stelle ist nachdrücklich zu betonen, dass diese Gleichung nur für ein ganz bestimmtes Bezugssystem Gültigkeit besitzt. Dieses Bezugssystem ist so zu wählen, dass in ihm das Magnetfeld ruht. \vec{v} ist die Geschwindigkeit des Ladungsträgers bezüglich dieses Bezugssystems.

Die Lorentz-Kraft geht auf Hendrik Antoon LORENTZ (1853 – 1928) zurück, welcher im Jahre 1892 Transformationsgleichungen für elektrische und magnetische Felder bei relativ zueinander bewegten Bezugssystemen aufstellte. Diese Gleichungen erlangten große Bedeutung im Zusammenhang mit der Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie. Ein Sonderfall dieser Gleichungen ist die obige Beziehung.

Bestätigt werden kann die Gleichung für die Lorentz-Kraft durch ein Experiment mit dem Fadenstrahlrohr. Dabei handelt es sich um eine evakuierte Glaskugel mit eingeschmolzenen Elektroden. Aus der geheizten Kathode treten gemäß dem glühelektrischen Effekt Elektronen aus. Diese Elektronen werden durch eine zwischen Kathode und Anode liegende elektrische Spannung auf ungefähr 3 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und treten dann durch eine Öffnung in der Anode in den von der Glaskugel umschlossenen Raum ein. Um die Bahn der Elektronen sichtbar zu machen befindet sich in dem Kolben Wasserstoff unter sehr kleinem Druck ($p = 1,3 \text{ Pa}$); durch Stoßionisation werden diese Gasteilchen zur Lichtemission angeregt und markieren auf diese

Weise die Bahn der Elektronen. Kathode und Anode sind so angeordnet, dass die Startgeschwindigkeit der Elektronen tangential zum Mittelpunkt der Glaskugel erfolgt. Wesentlich ist jetzt, dass die Glaskugel von einem homogenen Magnetfeld ($|\vec{B}| \approx 10^{-3} \text{ V s m}^{-2}$) durchsetzt wird. Die Richtung des Magnetfeldes und diejenige der Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen stehen in der Apparatur senkrecht aufeinander. Nach den vorausgegangenen Überlegungen wirkt jetzt die Lorentz-Kraft senkrecht zur Geschwindigkeit der Elektronen und senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes. Zur weiteren Berechnung der Bahn der Elektronen müssen jetzt die Gesetzmäßigkeiten der Mechanik herangezogen werden; aus diesen folgt, dass sich die Elektronen – unter den genannten Voraussetzungen – auf einer Kreisbahn bewegen. Der Radius der Kreisbahn kann durch Variation der Anodenspannung so geregelt werden, dass die Bahn innerhalb des Glaskolbens erfolgt und damit der Bahnradius direkt gemessen werden kann. Die Ergebnisse einer weiter gehenden Untersuchung stehen mit den getroffenen Annahmen über die Lorentz-Kraft in Einklang, stellen also eine experimentelle Stütze für diese Gleichung dar.

Weiter ist noch eine experimentelle Besonderheit hervorzuheben. Für den Versuch benötigt man ein homogenes Magnetfeld, welches durch eine lange Spule hergestellt werden kann. Würde man die beschriebene Apparatur in das Innere einer solchen Spule einbringen, so wäre eine direkte Beobachtung der von den Elektronen beschriebenen Bahn nicht möglich. Bei dem Versuch ersetzt man daher die lang gestreckte Spule durch ein Helmholtz-Spulenpaar – eine besondere Anordnung zweier kurzer Spulen, die auf einer Achse liegen. Es lässt sich zeigen, dass das Magnetfeld zwischen diesen Spulen die gewünschte homogene Eigenschaft besitzt. Zwischen den beiden Spulen liegt der beschriebene Glaskolben, womit die experimentellen Voraussetzungen für die Existenz der Lorentz-Kraft erfüllt sind.

IV. Die elektromagnetische Induktion

Als elektromagnetische Induktion bezeichnet man das Phänomen, dass zwischen den Enden einer Leiterschleife eine elektrische Spannung entsteht, wenn sich der die Schleife durchsetzende magnetische Fluss im Laufe der Zeit ändert. Diese Entdeckung von Michael FARADAY (1791 - 1867) hat die gesamte Elektrizitätslehre nachhaltig beeinflusst, denn dank dieser Entdeckung war es möglich, Generatoren zu bauen und damit elektrische Quellen herzustellen, welche der bis dahin verfügbaren Volta'schen Säule weit überlegen waren. Ferner ist mit dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion der Bau von Transformatoren und damit die Herstellung von veränderlichen Wechselspannungen möglich, was für den Transport elektrischer Energie von entscheidender Bedeutung ist. Eine umfassende Energieversorgung auf elektrischer Grundlage, wie sie heute selbstverständlich erscheint, wäre ohne die Kenntnis der elektromagnetischen Induktion unmöglich.

1. Faradays große Entdeckung (1831)

Ausgangspunkt der Überlegungen von Faraday war der Versuch von Oersted. Das Ergebnis dieses Versuches kann in grundsätzlicher Weise als die Umwandlung von „Elektrizität“ in „Magnetismus“ interpretiert werden. Gestützt wurde diese Deutung im 19. Jahrhundert durch die Lehre des Dynamismus, welche auch von Faraday vertreten wurde. Nach dieser Auffassung gab es in der Natur eine „Kraft“, die bei allen Prozessen - trotz vielfältiger Umwandlungen - erhalten bleiben sollte. Diese „Kraft“ steht dem Begriff, den wir heute „Energie“ nennen, sehr nahe, man kann im Dynamismus also einen Vorläufer des Energieprinzips sehen. Gemäß den Vorstellungen Faradays sollte nicht nur die Umwandlung von Elektrizität in Magnetismus, sondern auch der umgekehrte Vorgang - also die Umwandlung von „Magnetismus“ in „Elektrizität“ - möglich sein. Alle diesbezüglichen Anstrengungen von Faraday brachten

zunächst kein Ergebnis, was teilweise auf die geringe Empfindlichkeit der damaligen Messinstrumente zurückzuführen ist. Insbesondere konnten auch mit sehr starken Magnetfeldern keine elektrischen Erscheinungen hervorgerufen werden. Die entscheidende Entdeckung machte Faraday dann mit zwei nebeneinander liegenden Spulen, von denen die erste an eine elektrische Quelle angeschlossen war, im Kreis der zweiten Spule lag ein Strommessgerät. Die Apparatur stellte also im Prinzip einen Transformator dar. Beim Ausschalten des Stromes in der ersten Spule beobachtete Faraday in der zweiten Spule einen kurzzeitigen elektrischen Strom. Das Entscheidende und Überraschende an der Entdeckung war, dass nicht konstante starke Magnetfelder (wie man vielleicht vermuten konnte), sondern die zeitliche Änderung von Magnetfeldern zu dem erhofften elektrischen Effekt führten, und dass dieser Effekt nur so lange auftritt, wie die Änderung des Magnetfeldes andauert. Mit den heute verfügbaren Geräten kann Faradays Entdeckung leicht demonstriert werden, wenn man zwei Spulen hintereinander stellt und in der ersten Spule den Strom ein- und ausschaltet. Die Wirkung lässt sich durch einen beide Spulen verbindenden Eisenkern wesentlich verstärken.

Nach der Entdeckung des grundsätzlichen Phänomens gilt die Suche den Parametern, welche die Größe der Induktionsspannung bestimmen. Mit den heute verfügbaren Geräten findet man ohne Schwierigkeiten die folgenden Abhängigkeiten.

Ergebnis 1: $|U_{\text{ind}}| \sim n$,
wobei n die Windungszahl der Induktionsspule bedeutet.

Ergebnis 2: $|U_{\text{ind}}| \sim A$,
dabei ist A die senkrecht zur magnetischen Feldrichtung stehende Querschnittsfläche der Induktionsspule, welche von dem sich ändernden Magnetfeld durchsetzt wird.

Ergebnis 3: $|U_{\text{ind}}| \sim (\Delta B / \Delta t)$,
hier ist $(\Delta B / \Delta t)$ die zeitliche Änderung der Flussdichte des Magnetfeldes, welches die Induktionsspule durchsetzt.

Die Zusammenfassung der Teilergebnisse liefert in unserem Maßsystem das Gesamtergebnis:

$$U_{\text{ind}} = - n A (\Delta B / \Delta t) , \text{ bzw. mit}$$

$$\Delta \Phi = A (\Delta B)$$

die Beziehung:

$$U_{\text{ind}} = - n (\Delta \Phi / \Delta t) .$$

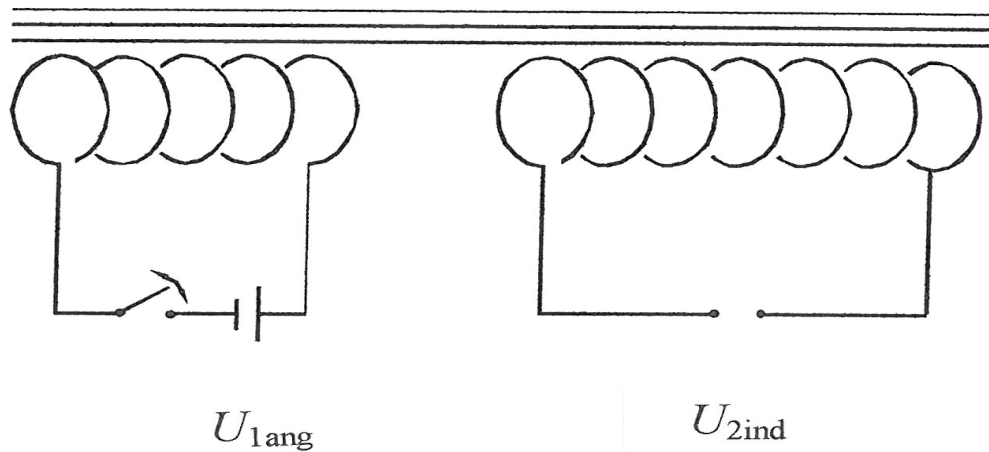


Abb. 4.1.1: Zur Entdeckung von Michael Faraday. Während in der ersten Spule ($n_1 = 250$) der Strom ein- und ausgeschaltet wird, kann an der zweiten Spule („Induktionsspule“, $n_2 = 10000$) ein Spannungsstoß beobachtet werden. Verstärkt werden kann der Effekt durch einen Eisenkern, welcher beide Spulen magnetisch verbindet.

Die Gleichung besagt, dass die zwischen den Enden einer Spule induzierte elektrische Spannung proportional der Windungszahl der Induktionsspule und der Änderungsgeschwindigkeit des die Spule durchsetzenden magnetischen Flusses ist. Das negative Vorzeichen hängt mit der Festlegung der elektrischen Spannung zusammen und wird später mit dem Lenz'schen Gesetz gedeutet.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Amerikaner Joseph HENRY (1797 – 1878) zur gleichen Zeit wie Faraday das Phänomen der elektromagnetischen Induktion entdeckte, seine Entdeckung allerdings erst nach Faraday veröffentlichte. Henry erkannte weiter als erster Wissenschaftler die Erscheinung der Selbstinduktion und konnte diese Entdeckung auch rechtzeitig veröffentlichen; ihm zu Ehren wurde die Einheit der Selbstinduktivität mit seinem Namen belegt.

Didaktischer Hinweis

Der Gedankengang Faradays und die Erscheinung der elektromagnetischen Induktion sind von größter Bedeutung. Es ist daher wichtig, dieses Phänomen - nämlich die Entstehung von „Elektrizität“ aus „Magnetismus“ - den Schülern einfach und dennoch eindrucksvoll zu demonstrieren.

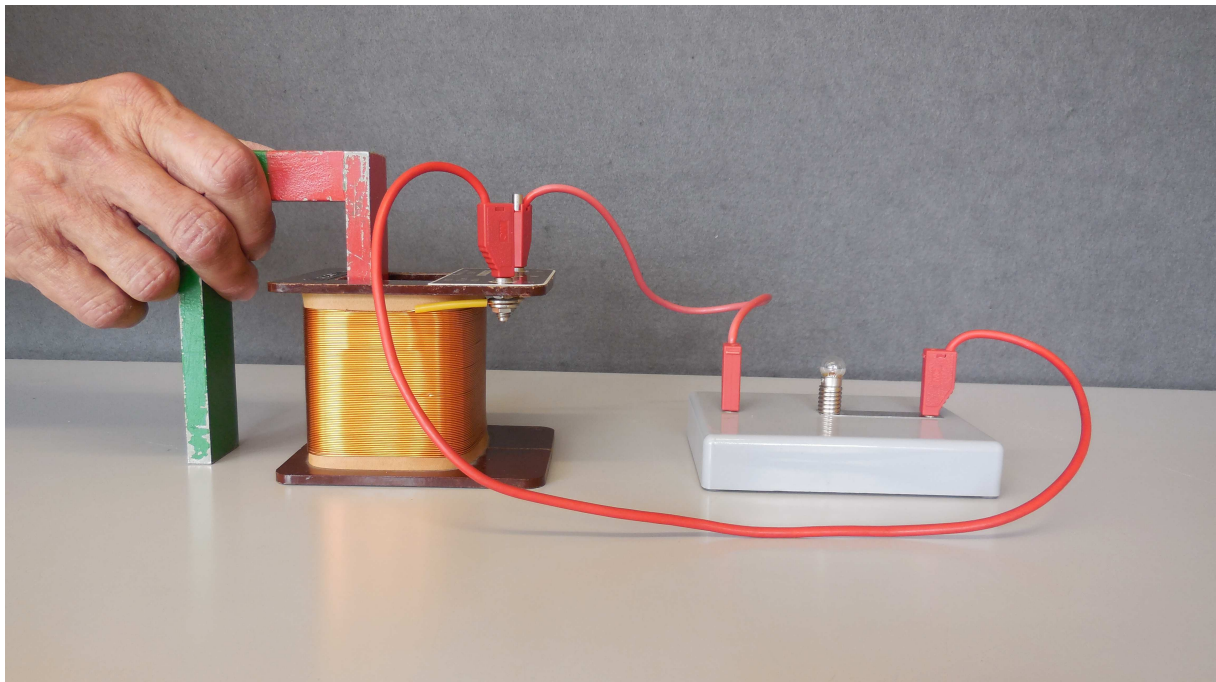


Abb. 4.1.2: Schulversuch zur Demonstration der elektromagnetischen Induktion. Wird ein starker Permanentmagnet sehr rasch aus einer Spule ($n = 1000$ Windungen) herausgezogen, so leuchtet ein an die Induktionsspule angeschlossenes Glühlämpchen ($2,5\text{ V} / 0,1\text{ A}$) während dieser Zeit kurz auf.

Eine Möglichkeit zur Erreichung dieses Zieles bietet der folgende Versuch. An eine Spule ($n = 1000$) wird ein Glühlämpchen ($2,5 \text{ V} / 0,1 \text{ A}$) angeschlossen. In diesem geschlossenen Leiterkreis, welcher aus der Sicht der Schüler betrachtet keine elektrische Quelle enthält, kann das Lämpchen - wenn auch nur kurzzeitig - zum Leuchten gebracht werden, wenn ein starker Permanentmagnet ($B \approx 0,01 \text{ T}$) ruckartig aus der Spule herausgezogen wird (Das Überstülpen der Spule über den Magneten erfordert mehr Geschick und gelingt schwieriger). Das kurze Aufblitzen des Lämpchens zeigt den Schülern das Wesentliche:

Wenn sich im Inneren einer Spule das Magnetfeld (in Richtung der Spulenachse) im Laufe der Zeit ändert, so entsteht zwischen den Enden der Spule eine elektrische Spannung (und zwar nur während dieser Zeitspanne!).

Damit ist eine völlig neuartige elektrische Quelle für die Schüler entdeckt - das Tor zur Behandlung von Generator und Transformator ist geöffnet

2. Deutung der elektromagnetischen Induktion nach Maxwell (1862/1873)

Die Deutung der elektromagnetischen Induktion mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern ist die große Leistung von James Clerk MAXWELL (1831 - 1879). Die Veröffentlichung der nach Maxwell benannten Gleichungen erfolgte 1862 im Philosophical Magazine unter dem Titel „On Physical Lines of Force“. Eine umfassende Behandlung der Thematik erschien im Jahr 1873. Der zentrale Inhalt der zweiten Maxwellschen Gleichung, welche die elektromagnetische Induktion behandelt, besteht in dem Gedanken, dass ein sich im Laufe der Zeit änderndes Magnetfeld von einem ringförmig geschlossenen

elektrischen Feld umgeben ist. Diese Vorstellung von einem elektrischen Feld ist völlig neu gegenüber dem Begriff des elektrostatischen Feldes, welches durch ruhende elektrische Ladungen verursacht wird und durch Feldlinien von einer Ladungsart zur anderen beschrieben werden kann.

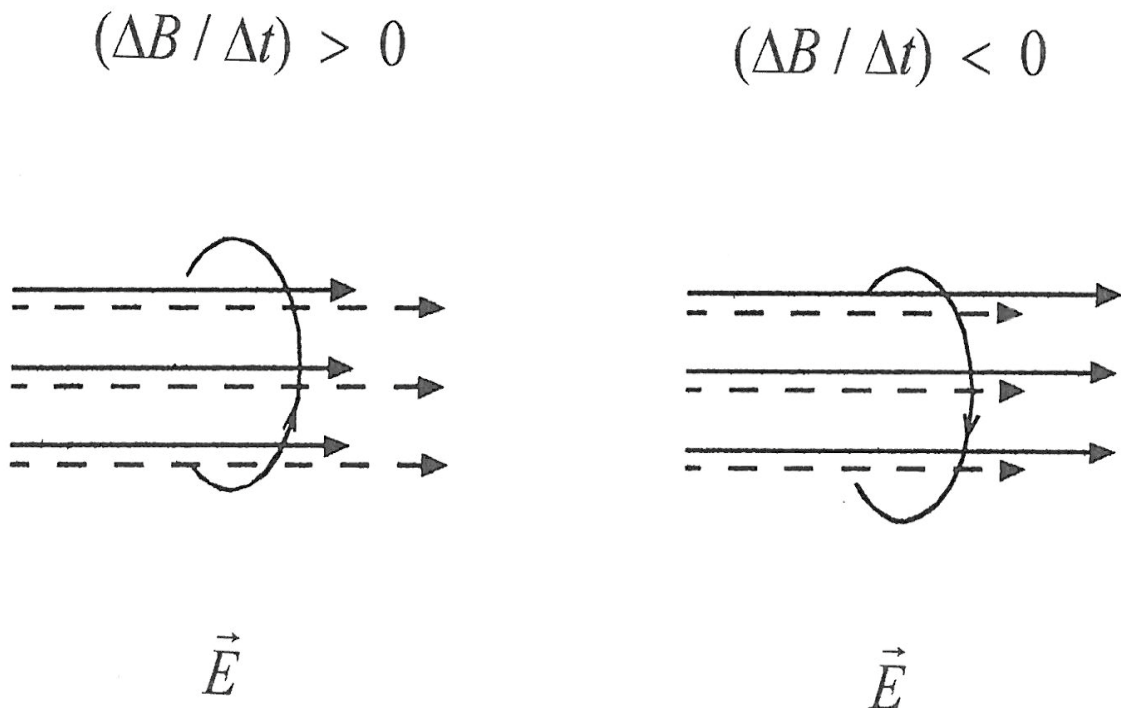


Abb. 4.2.1: Zur Interpretation der zweiten Maxwellschen Gleichung. Wächst der magnetische Fluss im Laufe der Zeit an, so ist das Magnetfeld von einem ringförmig geschlossenen elektrischen Feld umgeben, welches - in Magnetfeldrichtung gesehen - im Sinne einer Linksschraube orientiert ist. Wird das Magnetfeld im Laufe der Zeit schwächer, so kann die Richtung des dadurch entstandenen elektrischen Feldes mit einer Rechtsschraube charakterisiert werden.

Ganz anders ist dagegen dasjenige elektrische Feld, welches durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld hervorgerufen wird. Diese Art von elektrischem Feld besitzt keine elektrischen Ladungen, die Feldlinien sind ringförmig geschlossen und dieses Feld existiert nur so lange, wie sich das Magnetfeld ändert. Nimmt das Magnetfeld im Laufe der Zeit an Stärke zu, so kann die Richtung des elektrischen Feldes (in Richtung des Magnetfeldes gesehen) als Linksschraube beschrieben werden, bei einer Abnahme des Magnetfeldes entsprechend durch eine Rechtsschraube. Die Entstehung einer Induktionsspannung lässt sich dadurch zeigen, dass an den Ort des so hervorgerufenen elektrischen Feldes ein geeigneter Indikator, z.B. eine Drahtschleife, gebracht wird. Die in dem Draht befindlichen beweglichen elektrischen Ladungen werden durch das elektrische Feld verschoben, sammeln sich an den offenen Enden der Drahtschleife an und sind auf diese Weise als elektrische Spannung nachweisbar. Gedeutet werden kann das Entstehen einer Induktionsspannung auch mit Hilfe des von Maxwell beschriebenen geschlossenen elektrischen Feldes in Zusammenhang mit der allgemeinen Definition der elektrischen Spannung als Liniensumme des elektrischen Feldes gemäß der Beziehung

$$U = - \int_{S1}^{S2} \vec{E} \cdot d\vec{s} .$$

Mathematisch beschrieben wird dieser Tatbestand durch die zweite Maxwell'sche Gleichung

$$U_{\text{ind}} = - \oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

$U_{\text{ind}} = - \iint_A (\partial \vec{B} / \partial t) \cdot d\vec{A} .$

Die Gleichung besagt, dass die induzierte Spannung - gemessen als Liniensumme des elektrischen Feldes längs eines geschlossenen Weges - in Zusammenhang steht mit der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes, welches die von dem Linienelement umschlossene Fläche \vec{A} durchsetzt.

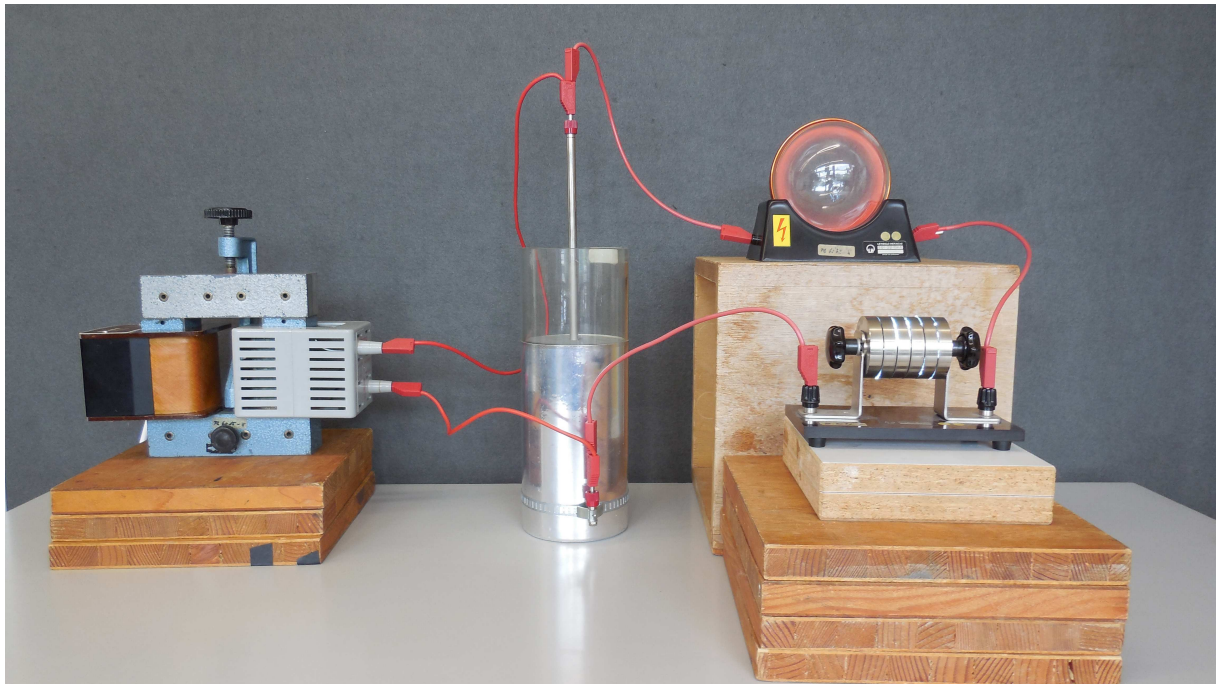
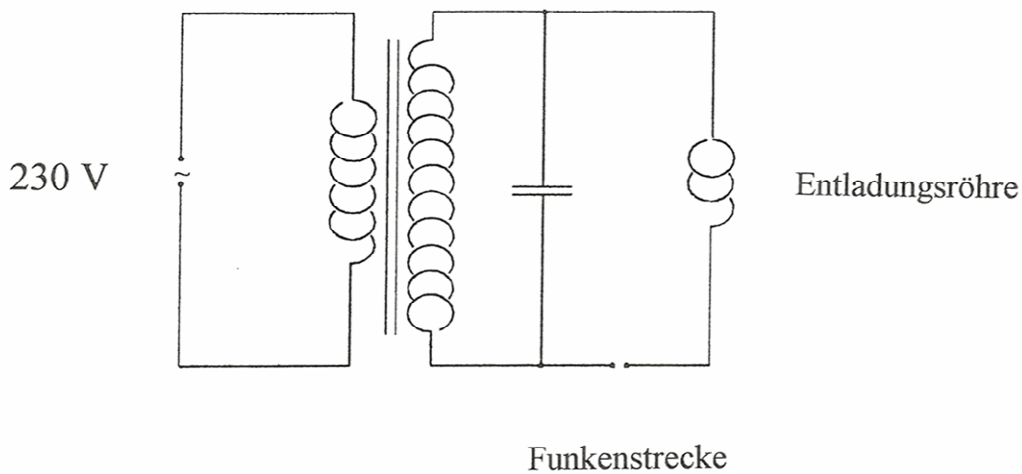


Abb. 4.2.2a: Zur Veranschaulichung der elektromagnetischen Induktion nach Maxwell. Ziel des Versuches ist es, durch ein Experiment zu zeigen, dass ein sich im Laufe der Zeit änderndes Magnetfeld von einem ringförmig geschlossenen elektrischen Feld umgeben ist. Dieses elektrische Feld wird in dem mit Wasserstoff (unter sehr geringem Druck) gefüllten Glaskolben als Gasentladung sichtbar gemacht. Die Skizze oben zeigt das grundsätzliche Schaltbild, das untere Bild den experimentellen Aufbau.



Abb. 4.2.2b: Zur Veranschaulichung der elektromagnetischen Induktion nach Maxwell.

In einer Spule ($n = 4$) wird durch einen Schwingkreis ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld erzeugt (Frequenz etwa 10^6 Hz); dieses bewirkt in einem mit Wasserstoff (unter sehr geringem Druck) gefüllten Glaskolben eine ringförmige elektrische (elektrodenlose!) Entladung, welche als Zeichen eines geschlossenen elektrischen Feldes interpretiert werden kann.

Kernstück des Versuches ist ein Schwingkreis; seine Bestandteile sind eine Leidener Flasche als Kondensator ($C = 2,0 \cdot 10^{-9}$ F) und die erwähnte Spule ($n = 4$). Energetisch wird der Schwingkreis durch eine Hochspannung (10.000 V) versorgt, welche mit einem Transformator aus Netzspannung (Verhältnis der Windungszahlen der Spulen 500 : 23000) hergestellt wird (**Lebensgefahr!**). Gesteuert wird die Energiezufuhr vom Transformator zu dem gedämpften Schwingkreis durch eine Funkenstrecke, welche bei genügend großer Spannung zündet und bei zu geringer Spannung die Entladung unterbricht, bis der Kondensator wieder hinreichend aufgeladen ist. Die Funkenstrecke fungiert wie ein automatisch arbeitender Schalter, welcher ständig geöffnet und geschlossen wird und auf diese Art und Weise die vom Schwingkreis abgegebene Energie zum richtigen Zeitpunkt vom Transformator her nachliefert.

Die Interpretation der elektromagnetischen Induktion nach Maxwell kann durch einen eindrucksvollen Versuch sichtbar gemacht werden. Das Kernstück der Apparatur ist eine Spule (bestehend aus nur 4 Windungen), welche einen Glaskolben umschließt, in welchem sich als Füllgas Wasserstoff unter sehr geringem Druck befindet. In dieser Spule wird ein hochfrequentes Wechselfeld (Frequenz etwa 10^6 Hz) erzeugt, d.h. der Quotient aus der Änderung des magnetischen Flusses und dem dazugehörigen Zeitintervall ist sehr groß; dies hat ein hinreichend starkes ringförmig geschlossenes elektrisches Feld zur Folge, welches in dem Glaskolben durch Anregung der Wasserstoffatome als geschlossener Kreis sichtbar gemacht werden kann. Die Herstellung des hochfrequenten Magnetfeldes erfolgt durch einen Schwingkreis, welcher durch eine Hochspannung aus einem Netztransformator gespeist wird (Vorsicht, **Lebensgefahr!**).

3. Erweiterung des Induktionsgesetzes

Beim Auffinden des im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Teiles des Induktionsgesetzes war in spezieller Weise vorgegangen worden. Ausgangspunkt bildete der Versuch von Oersted mit seiner Interpretation der Umwandlung von „Elektrizität“ in „Magnetismus“. Daran knüpfte sich die Frage, ob dieses Vorgehen nicht umkehrbar sei, was durch die Entdeckung Faradays bestätigt wurde.

Die geschilderte Vorgehensweise kann auf ein weiteres Phänomen übertragen werden. Der Versuch mit der „Leiterschaukel“ im Feld eines Dauermagneten (vgl. Abb. 3.2.3) zeigt, dass auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft ausgeübt wird. Die quantitative Untersuchung führt zur Lorentz-Kraft

$$\vec{F}_L = q (\vec{v} \times \vec{B}) .$$

Diese Kraft wirkt nicht nur auf einen festen Körper, sondern - wie der Versuch mit dem Fadenstrahlrohr zeigt - auch auf einzelne

bewegliche Träger von elektrischen Ladungen, z.B. Elektronen oder Ionen, wenn sich diese Ladungsträger quer zum Magnetfeld bewegen. Wesentlich dabei ist, dass über die Ursache der Bewegung des Ladungsträgers nichts vorausgesetzt wird, entscheidend ist nur dessen Bewegung - beschrieben durch seine Geschwindigkeit relativ zum ortsfesten Magnetfeld. Dies gibt Anlass zu folgender Vermutung:

Wenn leicht verschiebbare Ladungsträger - beispielsweise Elektronen in einem metallischen Leiter - auf mechanischem Wege quer zu einem Magnetfeld bewegt werden, so müsste auf diese Ladungsträger ebenfalls die Lorentz-Kraft wirken. Unter geeigneten Bedingungen könnte dies zu einer Ladungstrennung und damit zur Entstehung einer elektrischen Spannung führen.

Die Prüfung dieser Vermutung kann mit derjenigen experimentellen Anordnung erfolgen, mit welcher die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter untersucht wurde (Leiterschaukel, vgl. Abb. 3.2.3). Dazu ersetzt man die Batterie (welche für die Bewegung der Ladungsträger im Leiter sorgte) durch einen empfindlichen Spannungsmesser (z.B. einen Messverstärker, Messbereich ca. 10^{-12} V). Wird nun der Leiter mit der Hand quer zum Magnetfeld bewegt, so lässt sich zwischen den Enden des Leiters eine (wenn auch sehr kleine) Induktionsspannung nachweisen, und zwar so lange, wie der Leiter innerhalb des Magnetfeldes bewegt wird. Die Deutung des Effektes ist mit der Lorentz-Kraft möglich. Die verschiebbaren Ladungsträger befinden sich in dem Draht, und wenn dieser quer zum Magnetfeld bewegt wird, so bewegen sich in ihm auch die Ladungsträger mit der gleichen Geschwindigkeit. Als Folge davon wirkt die Lorentz-Kraft, es erfolgt eine Verschiebung der Ladungsträger im Leiter derart, dass sich Elektronen an einem Leiterende ansammeln (und am anderen Leiterende ein Elektronenmangel entsteht). Hier stellt sich die Frage, ob dieser Prozess beliebig lange andauert (sich also während der Bewegung

des Drahtes immer mehr Elektronen an dem Leiterende ansammeln, vorausgesetzt, dass das Magnetfeld eine hinreichend große räumliche Ausdehnung besitzt), oder ob dieser Vorgang der Ladungstrennung irgendwann zum Stillstand kommt. Es ist dieses Letztere der Fall, denn wenn wir (zur Vereinfachung der Betrachtung) annehmen, dass durch die Lorentz-Kraft an den Leiterenden positive und negative Ladungsträger angehäuft werden, so üben diese Ladungen aufeinander anziehende Kräfte aus, und diese sind der Lorentz-Kraft entgegengesetzt gerichtet. Der Vorgang der Ladungstrennung wird also dann aufhören, wenn sich die beiden Kräfte kompensieren. Für die anziehenden Kräfte gilt nach den Gesetzen der Elektrostatik die Beziehung:

$$\vec{F}_{\text{el}} = q \vec{E}.$$

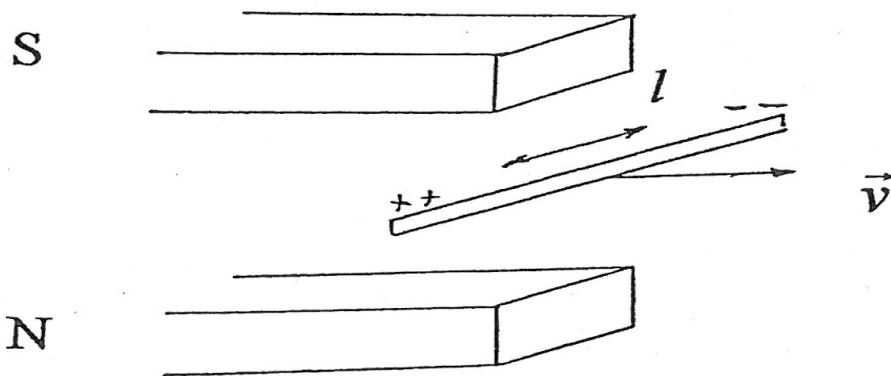


Abb. 4.3.1: Zur Herstellung einer Induktionsspannung auf der Basis der Lorentz-Kraft. Ein metallischer Leiter, welcher auf der Länge l von einem Magnetfeld durchsetzt wird, bewegt sich quer zu diesem Magnetfeld. Dann wird - so lange die Bewegung innerhalb des Magnetfeldes andauert - zwischen den Enden des Leiters eine elektrische Spannung induziert.

Die elektrische Feldstärke \vec{E} lässt sich bei Annahme eines homogenen Feldes durch die Spannung zwischen den Enden des Leiters und die wirksame Leiterlänge l ausdrücken, es gilt:

$$|\vec{E}| = (U / l) .$$

Aus der Gleichheit der beiden Kräfte folgt unter der Voraussetzung, dass bei der Lorentz-Kraft die beteiligten vektoriellen Größen senkrecht aufeinander stehen:

$$q v B = q (U / l) ,$$

und somit für die auf diese Weise induzierte elektrische Spannung:

$$|U_{\text{ind}}| = B l v .$$

Die Beziehung gilt für einen einzigen Leiter, werden n Leiter hintereinander geschaltet, so erfolgt eine entsprechende Spannungsvergrößerung, es gilt:

$$|U_{\text{ind}}| = n B l v .$$

Diese Gleichung stellt eine Erweiterung des Induktionsgesetzes dar, welche verbal folgendermaßen formuliert werden kann:

Bewegt sich ein Leiter quer zum Magnetfeld, so wird zwischen seinen Enden eine elektrische Spannung induziert, welche proportional zur Flussdichte des Magnetfeldes, zur Geschwindigkeit des Leiters quer zum Magnetfeld und zur vom Magnetfeld durchsetzten Leiterlänge ist.

Damit ist es möglich, die beiden Anteile des Induktionsgesetzes mit Hilfe der Schreibweise der Vektoranalysis zusammen zu fassen. Es ergibt sich:

$$U_{\text{ind}} = - \iint_A (\partial \vec{B} / \partial t) \cdot d\vec{A} - \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s} .$$

Bei der Anwendung der Gleichung ist zu beachten, dass das Magnetfeld im Bezugssystem ruht, dass die Integration längs des Linienelementes $d\vec{s}$ des Leiterstückes erfolgt und dass sich das Leiterstück mit der Geschwindigkeit \vec{v} relativ zum Magnetfeld bewegt.

Anmerkung zur Demonstration der Induktionsspannung

Wie aus der Formulierung des Induktionsgesetzes zu ersehen ist, kann eine Induktionsspannung auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Einige Varianten sind nachfolgend aufgeführt.

Variante 1

Eine Induktionsspannung kann in einer Spule dadurch erzeugt werden, dass sich das Magnetfeld im Inneren der Spule (längs der Spulenachse) ändert. Experimentell realisiert werden kann dies in der nachfolgend beschriebenen Weise.

Induktionsspule und Feld erzeugende Spule werden durch einen Eisenkern magnetisch miteinander verbunden. Ändert man jetzt die Stromstärke in der Feldspule (durch Veränderung der angelegten Spannung oder durch Ein- und Ausschalten des Spulenstromes), so ändert sich die magnetische Flussdichte \vec{B} in der Feldspule und damit auch (infolge der magnetischen Kopplung beider Spulen durch den gemeinsamen Eisenkern) in der Induktionsspule. Auf Grund des Induktionsgesetzes entsteht in der Induktionsspule ein Spannungsstoß.

Variante 2

Die wesentliche Voraussetzung für die Entstehung einer Induktionsspannung in einer Spule ist die Änderung des magnetischen Flusses im Inneren der Induktionsspule. Eine Möglichkeit dazu ist - wie in Variante 1 erwähnt - die Änderung des magnetischen Flusses in der Feldspule. Es besteht jedoch noch eine weitere Möglichkeit zur Änderung des magnetischen Flusses in der Induktionsspule. Dies kann in der Weise geschehen, dass man die Fläche der Induktionsspule verändert, welche von dem magnetischen Fluss der Feldspule senkrecht durchsetzt wird. Dabei fließt durch die Feldspule ein

konstanter Strom, das dadurch erzeugte Magnetfeld ist räumlich und zeitlich konstant und wirkt auf die Induktionsspule. Jetzt wird die im Inneren (oder an den Polen) der Feldspule liegende Induktionsspule gedreht - und zwar um eine Achse, welche senkrecht zu ihrer Spulenachse orientiert ist. Damit ändert sich im Laufe der Zeit diejenige Fläche der Induktionsspule, welche senkrecht vom magnetischen Fluss durchsetzt wird. Die Folge ist eine Änderung der magnetischen Flussdichte durch die wirksame Fläche der Induktionsspule, und dies führt zu einer Induktionsspannung in dieser Spule. Angewandt wird dieses Verfahren beim Generator.

Variante 3

Diese Variante bezieht sich auf die dargestellte Erweiterung der Formulierung des Induktionsgesetzes auf der Grundlage der Lorentz-Kraft. Ein gerader Leiter wird quer zu einem konstanten Magnetfeld bewegt. Als Folge der wirkenden Lorentz-Kraft entsteht zwischen den Enden des Leiters eine Induktionsspannung; diese kann durch Hintereinanderschaltung mehrerer Leiter vergrößert werden. Es sei betont, dass sich diese Betrachtungsweise ausschließlich auf die Bewegung des Leiters quer zum Magnetfeld bezieht - eventuell vorhandene Kabelverbindungen von den Enden des Leiters zu einem angeschlossenen Messgerät liegen außerhalb des Magnetfeldes und sind für den Induktionsprozess ohne Belang.

Didaktischer Hinweis

Der zweite Teil des Induktionsgesetzes, welcher auf der Lorentzkraft beruht, kann ohne Messverstärker mit einfachen schulischen Mitteln demonstriert werden. Man benötigt dazu einen starken Hufeisenmagneten und einen Leiterraum mit 100 Wicklungen, also mit 100 hintereinander geschalteten Leiterstücken. An die Enden dieses Leiterraums wird ein empfindlicher Strommesser (Messbereich 1 mA; Zeiger mit Mittelstellung) angeschlossen.

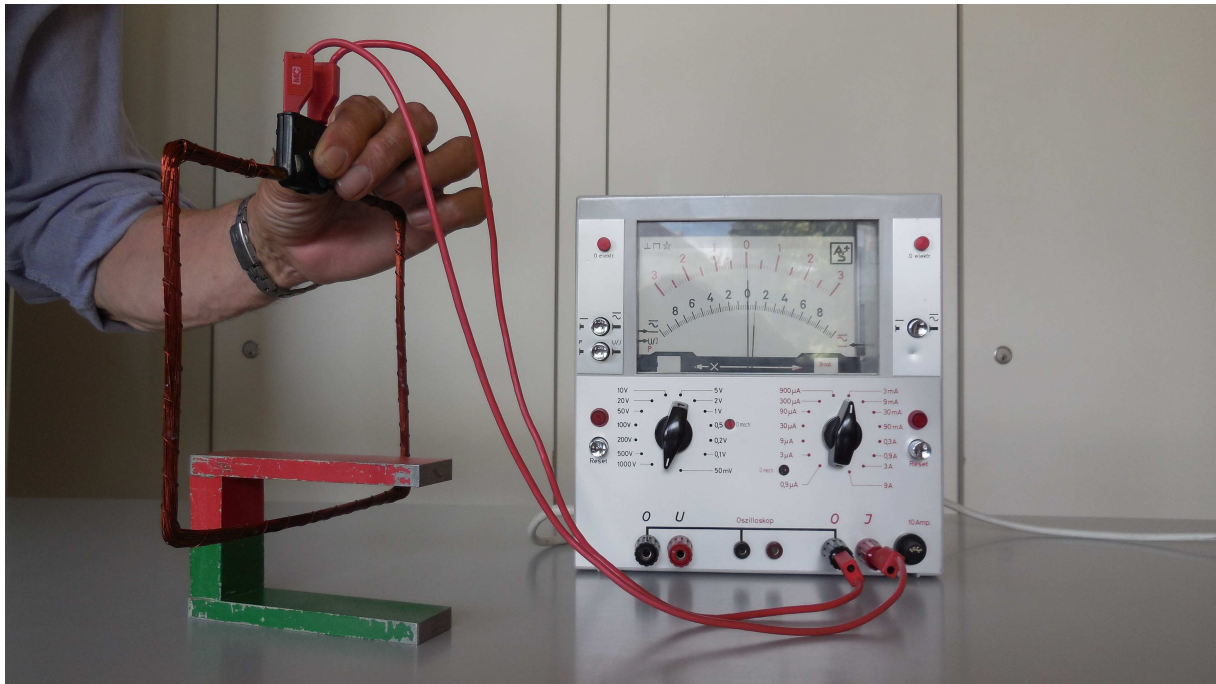


Abb. 4.3.2: Schulversuch zur Demonstration einer Induktionsspannung, die in einem Leiter entsteht, welcher quer zu einem Magnetfeld bewegt wird.

Wird der Leiterraum innerhalb des Magnetfeldes hin und her bewegt, so ist ein deutlicher Zeigerausschlag (je nach Bewegungsrichtung nach der einen oder nach der anderen Seite der Nullstellung hin) zu beobachten. Es ist wichtig, die Schüler darauf aufmerksam zu machen, dass in diesem Fall der Leiter den räumlichen Bereich des Magnetfeldes nicht verlässt, dass sich also für die elektrischen Ladungen im Leiter das Magnetfeld nicht ändert, was eine Bedingung für das Auftreten der Lorentz-Kraft darstellt. War beim ersten Teil des Induktionsgesetzes die zeitliche Änderung des Magnetfeldes entscheidend, so ist beim zweiten Teil dieses Gesetzes die Bewegung des Leiters innerhalb des unveränderten Magnetfeldes die wesentliche Ursache für die Entstehung der Induktionsspannung.

4. Das Lenz'sche Gesetz (1834)

Die Lenz'sche Regel oder das Lenz'sche Gesetz (1834 von Heinrich LENZ entdeckt) stellt einen wichtigen Zusatz zum Induktionsgesetz dar, denn es verknüpft die Ursache der Induktion mit deren Wirkungen und kann wie folgt formuliert werden:

Die durch die elektromagnetische Induktion
entstehenden Spannungen,
Ströme, Felder und Kräfte sind stets so gerichtet,
dass sie den die
Induktion einleitenden Vorgang zu behindern
suchen.

Der Nachdruck liegt hier auf der allgemeinen Bezeichnung „behindern“, da häufig das Lenzsche Gesetz so formuliert wird, dass man sagt, die entstehenden Felder und Kräfte seien der Ursache entgegengesetzt gerichtet. Diese Formulierung trifft für viele Beispiele zu, es gibt jedoch auch gegenteilige Erscheinungen, wie noch gezeigt werden wird.

Das Lenz'sche Gesetz kann eindrucksvoll vorgeführt werden, wenn man eine Aluminiumplatte im Magnetfeld zwischen den Polen eines Elektromagneten fallen lässt (Windungszahl der Spulen $n = 500$ auf geschlossenem Eisenkern; Stromstärke bei kurzfristiger Überlastung der Spulen 10 A oder mehr). Die Platte fällt nicht wie im freien Fall, sondern stark behindert, als würde sie sich durch eine zähe Flüssigkeit bewegen. Deuten lässt sich das Phänomen durch eine zweifache Anwendung der Lorentz-Kraft. Zunächst fällt die Metallplatte nach unten, die in der Platte befindlichen verschiebbaren Ladungsträger bewegen sich quer zum Magnetfeld, es wirkt die Lorentz-Kraft und als Folge davon strömen Träger positiver Ladungen nach unten. Diese Strömung kann einen geschlossenen Kreis bilden, wenn das Magnetfeld nur einen Teil der Metallplatte durchsetzt und die Ladungsträger außerhalb des Magnetfeldes zum Ausgangspunkt zurückfließen

können. Das Strömen dieser Ladungsträger erfordert eine zweite Anwendung der Lorentz-Gleichung, welche besagt, dass auf die sich quer zum Magnetfeld bewegendenden positiven Ladungsträger eine Kraft nach oben wirkt, welche die nach unten gerichtete Fallbewegung der Metallplatte behindert.

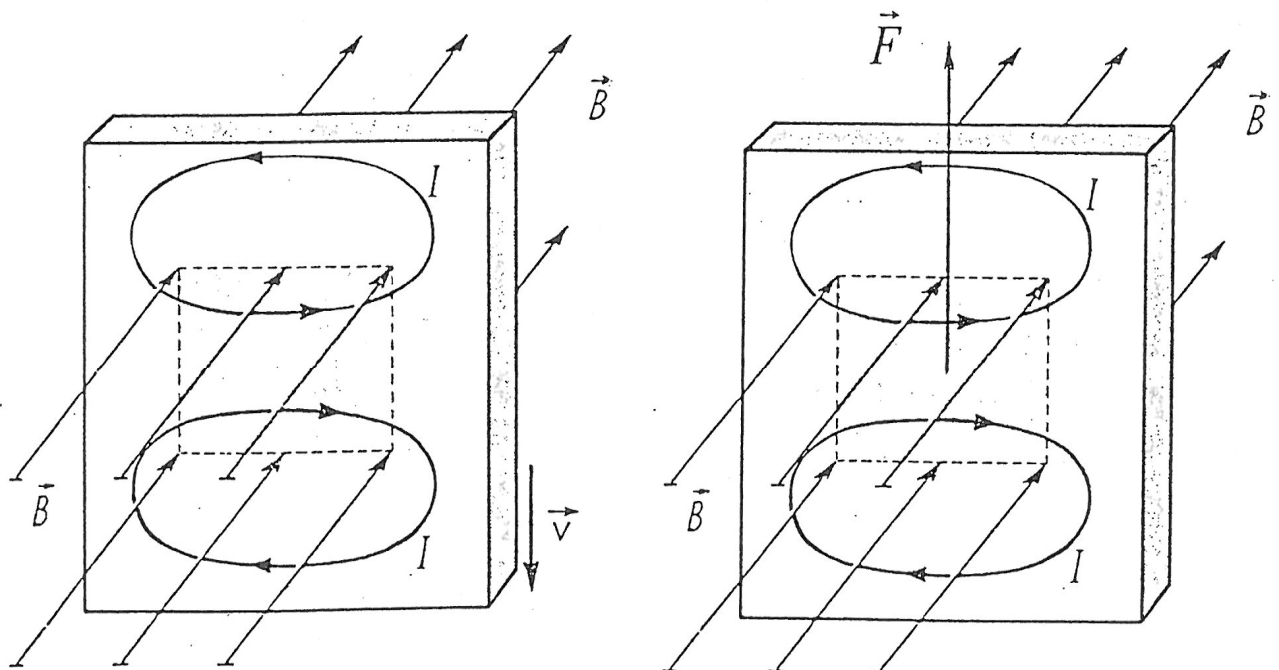


Abb. 4.4.1: Zur Demonstration des Lenz'schen Gesetzes. Eine Aluminiumplatte fällt zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten nach unten. Als Folge dieser Bewegung tritt ein Induktionsstrom auf, welcher dann geschlossen ist, wenn das Magnetfeld nur einen Teil der Platte durchsetzt, die Ladungen also außerhalb des Magnetfeldes zum Ausgangspunkt zurückfließen können. Jetzt ist eine erneute Anwendung der Lorentz-Gleichung auf die sich im Magnetfeld bewegendenden Ladungsträger nötig; auf sie und damit auf die Metallplatte wird eine Kraft nach oben ausgeübt, welche die nach unten gerichtete Fallbewegung der Platte behindert.

Das entsprechende Phänomen tritt auf, wenn eine Metallplatte als Pendel aufgehängt wird und sich zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten bewegt. Durchsetzt das Magnetfeld nur einen Teil der Metallplatte, so bewirken bei der Schwingung der Platte die Induktionsströme und die damit verbundenen Kräfte ein starkes Abbremsen der Pendelbewegung. Der Effekt kann verringert werden, wenn die Ausbildung von Induktionsströmen durch Schlitze in der Platte eingeschränkt wird.

Angewandt wird dieses Erkenntnis beim Bau der Wirbelstrombremse, was sich folgendermaßen zeigen lässt: Eine gut gelagerte Metallscheibe (wie sie z.B. beim Modell eines Elektroenergiezählers verwendet wird) dreht sich zwischen den Polen eines Elektromagneten; beim Einschalten des Magneten entsteht eine sehr starke Bremswirkung. Ist bei einem Fahrzeug diese Bremsscheibe mit einem Generator verbunden, so lässt sich auf diese Weise beim Abbremsen die kinetische Energie des Wagens teilweise in elektrische Energie umwandeln, was einen Vorteil gegenüber einer konventionellen Bremse bedeutet, da bei dieser beim Bremsvorgang die kinetische Energie in nicht mehr nutzbare Wärme umgesetzt wird.

Eine weitere Anwendung des Lenz'schen Gesetzes findet man beim Bau von Transformatoren. In den Spulen dieser Geräte entstehen magnetische Wechselfelder. Die Folge dieser Felder sind nicht nur erwünschte Induktionsströme in den Sekundärspulen, sondern auch Wirbelströme in den Eisenkernen, was unerwünschte Verluste mit sich bringt. Um die Entstehung dieser Wirbelströme teilweise zu unterbinden, werden die Eisenkerne nicht massiv aus einem Block gebaut, sondern aus Lamellen zusammengesetzt, welche gegeneinander elektrisch isoliert sind („geblätterter Eisenkern“).

5. Ergänzung zum Vorzeichen der Induktionsspannung

Zur Klärung der Frage des Vorzeichens der Induktionsspannung soll der Grundversuch nach Faraday näher untersucht werden, und zwar getrennt für den Einschalt- und den Ausschaltvorgang. Die beiden Spulen - die Feldspule und die Induktionsspule - liegen hintereinander, sind beide im gleichen Sinn gewickelt (also z.B. im Sinne einer Rechts- oder einer Linksschraube) und sind zur Verstärkung der Induktionsspannung durch einen eingeschobenen Eisenkern magnetisch miteinander verbunden. An jeder Spule liegt ein Spannungsmesser mit Zeiger in Mittelstellung.

Beim Einschaltvorgang schlagen beide Spannungsmesser nach der gleichen Richtung aus; der Spannungsausschlag bei der Feldspule bleibt erhalten, die Spannungsanzeige an der Induktionsspule geht nach dem Ausschlag wieder auf null zurück, nachdem das Magnetfeld in der ersten Spule seine volle Größe erreicht hat. Gedeutet werden kann die Erscheinung nach Maxwell. An die Feldspule wird eine Spannung angelegt, sie wird vom Spannungsmesser angezeigt. Das im Laufe der Zeit anwachsende Magnetfeld ist von einem ringförmig geschlossenen elektrischen Feld umgeben, und zwar entsteht dieses elektrische Feld infolge der magnetischen Kopplung der beiden Spulen insbesondere auch in der Induktionsspule, wo es gemäß seiner Richtung eine Ladungstrennung der beweglichen Ladungsträger bewirkt, d.h. an den Spulenenden sammeln sich die verschiebbaren Ladungsträger an (der Einfachheit halber können dabei positive und negative Ladungsträger in gleicher Weise als verschiebbar angesehen werden). Welche Ladungsträger sich an den Spulenenden ansammeln hängt neben der Richtung des elektrischen Feldes auch vom Wicklungssinn der Spule ab. Bei der in der Skizze angenommenen Rechtsschraube für die Wicklung ergibt sich die eingezeichnete Polung an der Induktionsspule, sie stimmt mit der Polung der Feldspule überein.

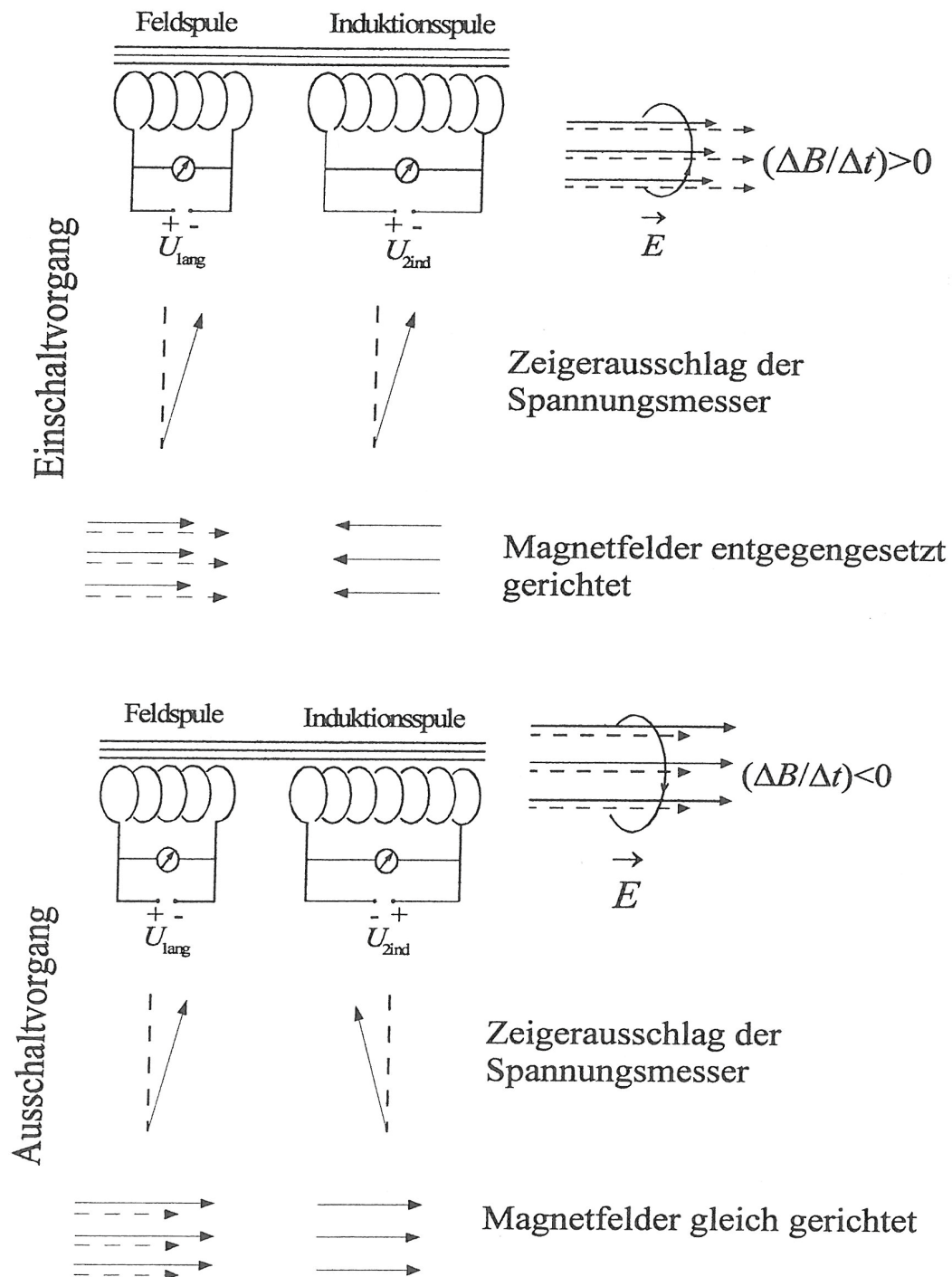


Abb. 4.5.1: Zum Vorzeichen bei der Induktionsspannung. Beim Einschaltvorgang sind beide Spannungen gleich gerichtet, die Magnetfelder in beiden Fällen entgegengesetzt orientiert. Beim Ausschaltvorgang sind die Spannungen an den Spulen entgegen gesetzt und die Magnetfelder gleich gerichtet.

Gedeutet werden kann dieses Ergebnis nach Maxwell durch die Richtung des beim Induktionsvorgang entstehenden ringförmig geschlossenen elektrischen Feldes unter Beachtung des Wicklungssinnes der Spule und der Regeln für die Richtung von Magnetfeldern bei Einbeziehung der Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Da die elektrische Feldstärke so definiert ist, dass Feldrichtung und Kraft auf eine positive Ladung übereinstimmen, so ist es zweckmäßig, bei der Ermittlung der Richtung von elektrischen Strömen und Magnetfeldern von der Bewegung positiver Ladungsträger auszugehen.

Des Weiteren entsteht bei der Ladungstrennung durch den Induktionsvorgang in der Induktionsspule ein elektrischer Strom, welcher ein Magnetfeld in der Induktionsspule zur Folge hat. Die Richtung dieses Magnetfeldes erhält man aus der Bewegungsrichtung der (hier als positiv angenommenen) Ladungsträger. Es ergibt sich, dass beim Einschaltvorgang das Magnetfeld in der Induktionsspule demjenigen in der Feldspule entgegengesetzt gerichtet ist.

Beim Ausschaltvorgang kann der Zeigerausschlag der Spannungsmesser an Feld- und Induktionsspule entsprechend betrachtet werden. Beim Abschalten der Spannung an der Feldspule ergibt sich am Spannungsmesser der Induktionsspule ein Zeigerausschlag, welcher demjenigen an der Feldspule entgegengesetzt gerichtet ist. Die Betrachtung nach Maxwell führt zu folgendem Ergebnis: Beim Abschalten der Spannung an der Feldspule wird das Magnetfeld in dieser Spule schwächer, es entsteht ein ringförmig geschlossenes elektrisches Feld in der Induktionsspule. Die Richtung dieses elektrischen Feldes wird durch eine Rechtsschraube beschrieben, in der Induktionsspule erfolgt eine Ladungstrennung mit dem Ergebnis, dass die Polung an der Induktionsspule entgegengesetzt gerichtet ist der Polung an der Feldspule (das Ergebnis kann aus der Richtung des elektrischen Feldes und dem Wicklungssinn der Spule abgeleitet werden). Auch in diesem Fall hat die Ladungstrennung einen Strom in der Spule zur Folge, was zur Ausbildung eines

Magnetfeldes im Inneren der Induktionsspule führt. Die Richtung des Magnetfeldes lässt sich mit den bekannten Regeln aus der Bewegungsrichtung der Ladungsträger und ihrem Vorzeichen bestimmen. Es ergibt sich, dass das Magnetfeld in der Induktionsspule in der gleichen Richtung orientiert ist wie dasjenige der Feldspule. Dieses (vielleicht überraschende) Ergebnis kann mit der angegebenen Formulierung des Lenz'schen Gesetzes zutreffend beschrieben werden, denn beim Ausschaltvorgang sucht das in der Induktionsspule entstehende Magnetfeld die Abnahme des Magnetfeldes in der Feldspule - also den die Induktion einleitenden Vorgang - zu behindern, was möglich ist, wenn beide Felder gleich gerichtet sind.

Zum Vorzeichen der Spannung sei noch auf einen weiteren Tatbestand aufmerksam gemacht. Bei der Feldspule bedeutet das positive Vorzeichen an einem Spulenende (formal gesehen) einen Überschuss an positiven Ladungsträgern und damit einen entsprechenden Ausschlag des Spannungsmessers. Darüber hinaus sagt das Vorzeichen aber auch, dass sich positive Ladungsträger an dieser Stelle in die Feldspule hinein bewegen. Bei einem Überschuss von positiven Ladungsträgern am gleichen Ende der Induktionsspule wie bei der Feldspule erhält man einen Zeigerausschlag des Spannungsmessers in die gleiche Richtung. Dennoch gibt es einen wesentlichen Unterschied, und dieser liegt in der Bewegungsrichtung der Ladungsträger. Während sich an der betreffenden Stelle der Feldspule die Ladungsträger in die Spule hinein bewegen (angetrieben von der außen liegenden elektrischen Quelle), bewegen sich die Ladungsträger an der entsprechenden Stelle der Induktionsspule aus dieser heraus. Im ersten Fall fungiert die außen liegende Batterie als elektrischer Antrieb für die Ladungsträger, im zweiten Fall ist dies die Induktionsspule. Bezieht man die Bewegungsrichtung der Ladungsträger mit in die Definition des Vorzeichens der elektrischen Spannung ein, so besitzen die Vorzeichen der Spannung bei Feld- und Induktionsspule sowohl beim Ein- als

auch beim Ausschaltvorgang eine jeweils entgegen gesetzte Bedeutung. Diese Besonderheit sei nochmals hervor gehoben.

- Das positive Vorzeichen an der Feldspule besagt, dass durch die von außen angelegte elektrische Spannung eine Bewegung positiver Ladungsträger in die Feldspule hinein bewirkt wird.
- Das positive Vorzeichen an der Induktionsspule besagt, dass an dieser Stelle - hervorgerufen durch den Induktionsvorgang - positive Ladungsträger aus dem Spulenende heraustreten.

Das positive Vorzeichen deutet also auf einen gleichen und einen sehr unterschiedlichen Sachverhalt hin.

- Der gleiche Sachverhalt besagt, dass an dem betrachteten Ende der Spule ein Überschuss an positiven Ladungsträgern besteht (und folglich eine tatsächliche oder mögliche Strömung dieser Ladungsträger existiert).
- Der unterschiedliche Sachverhalt bezieht sich auf die (tatsächliche oder mögliche) **Bewegungsrichtung der Ladungsträger**, sie ist in den betrachteten beiden Fällen entgegen gesetzt gerichtet.

Die hier geschilderte Beschreibung des Induktionsvorganges bei zwei Spulen kann auf eine einzige Spule übertragen werden, wenn man sich die Feldspule und die Induktionsspule zu einer einzigen Spule zusammengefügt vorstellt. In diesem Fall hat beim Einschaltvorgang (also beim Anlegen der äußeren Spannung) das stärker werdende Magnetfeld ein ringförmig geschlossenes elektrisches Feld, also eine Induktionsspannung, zur Folge. Dieses durch Induktion entstandene elektrische Feld behindert eine Bewegung der Ladungsträger, was zur Folge hat, dass die Stromstärke in der Spule beim Einschalten nur langsam anwächst und dass der Ladungsträgerstrom nach dem Ausschalten noch eine gewisse Zeit weiter besteht.

6. Anwendungen des Induktionsgesetzes

Die wichtigsten Anwendungen des Induktionsgesetzes sind der Wechselspannungsgenerator und der Transformator. Der erstgenannte dient zur Umwandlung einer Ausgangsenergie in elektrische Energie, der Transformator schafft die Grundlage für eine verhältnismäßig einfache Übertragung elektrischer Energie. Betrachtet man die gewaltigen Energieströme von den Elektrizitätswerken zu den Abnehmern, so beträgt der Energiestrom in den Übertragungsleitungen

$$P = U I .$$

Die Wärmeverlustleistung in den Leitungen beträgt

$$P_v = R I^2 ,$$

sie wächst also mit dem Quadrat des Elektronenstromes in den Leitungen. Um diese Verluste gering zu halten, muss der Elektronenstrom in den Energieübertragungsleitungen möglichst klein sein. Um andererseits aber dennoch einen großen Energiestrom übertragen zu können, muss das Produkt aus U und I groß sein, was bei relativ kleinen Elektronenströmen I eine möglichst große elektrische Spannung U erfordert. Die Spannungen in den Übertragungsleitungen sind entsprechend groß, sie betragen gegenwärtig 380 kV in Europa und bis 1000 kV in Übersee bei besonders großen Entfernungen. Wichtig ist, dass mit Transformatoren die Wechselspannungen für den Energietransport ohne bewegliche Teile vergrößert und am Ort des Energieabnehmers in entsprechender Weise wieder auf das gewünschte Maß verkleinert werden können.

6.1 Der Wechselspannungsgenerator

Das Prinzip des Wechselspannungsgenerators besteht darin, dass sich im Inneren einer Spule das Magnetfeld periodisch ändert und auf diese Weise zwischen den Spulenenden eine elektrische Spannung induziert wird, und zwar in der Art, wie es dem

Grundversuch entspricht. Allerdings besteht gegenüber dem Grundversuch ein wichtiger Unterschied. Beim Grundversuch der Induktion war der Flächeninhalt der Induktionsspule konstant, der Versuchsablauf war dadurch gekennzeichnet, dass sich das die Induktion verursachende Magnetfeld im Laufe der Zeit änderte. Beim Wechselspannungsgenerator ist die Vorgehensweise anders. Ausgangspunkt ist ein zeitlich und räumlich konstantes Magnetfeld, in welchem sich eine Spule derart bewegt, dass sich die vom Magnetfeld durchsetzte Spulenfläche im Laufe der Zeit ständig ändert. Erreicht wird dies durch eine gleichmäßige Rotation der Spule um eine quer zum Magnetfeld liegende Achse. Auf diese Weise wird eine Änderung des magnetischen Flusses in der Induktionsspule gemäß folgender Beziehung erreicht:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta(BA)}{\Delta t} .$$

Für ein zeitlich konstantes Magnetfeld der Kraftflussdichte vom Betrag B ergibt sich:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = B \frac{(\Delta A)}{(\Delta t)} .$$

Ist α der Winkel zwischen der Spulenachse und der Richtung des Magnetfeldes, so folgt bei gleichmäßiger Rotation der Spule für die sich im Laufe der Zeit ändernde Spulenfläche:

$$A = A_0 \cos \alpha$$

$$A = A_0 \cos \omega t ,$$

wobei A_0 die maximale Spulenfläche und ω die Winkelgeschwindigkeit der Rotation bedeutet.

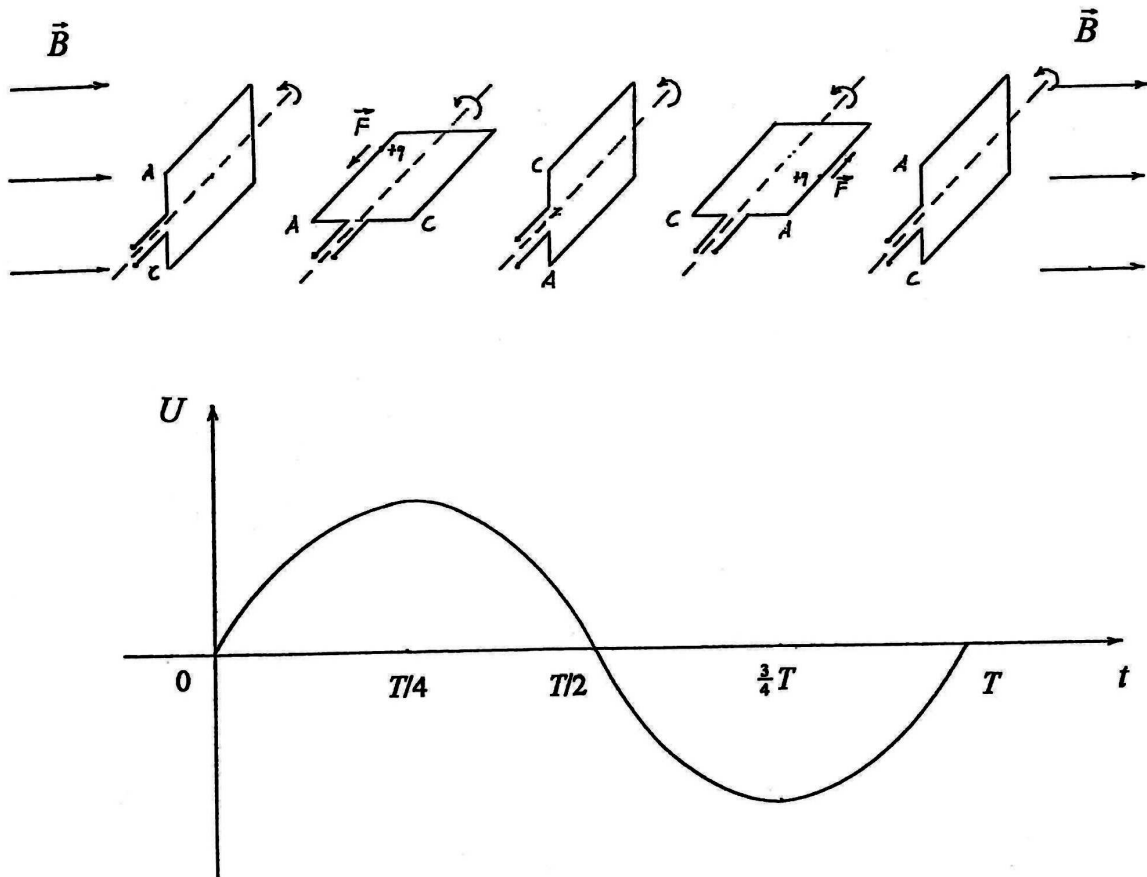


Abb. 4.6.1: Eine Wechselspannung kann nach dem Induktionsgesetz durch die zeitliche Änderung eines Magnetfeldes im Inneren einer Spule erzeugt werden. Das lässt sich auch bei konstantem Magnetfeld erreichen, wenn in dem Feld eine Spule rotiert und sich dabei die Komponente des Magnetfeldes in Richtung der Spulenachse im Laufe der Zeit periodisch ändert. Bei gleichmäßiger Rotation der Spule entsteht an ihren Enden eine sinusförmige Wechselspannung.

Damit ergibt sich nach dem Induktionsgesetz für die in der Spule mit n Windungen induzierte elektrische Spannung:

$$U_{\text{ind}} = - n B \frac{d}{dt} (A_o \cos \omega t)$$

$$U_{\text{ind}} = (n B A_o) \sin \omega t$$

$$U_{\text{ind}} = U_o \sin \omega t .$$

Die induzierte Spannung kann an den Spulenden mit Schleifkontakten über zwei Ringe abgenommen werden, was an Lehrmittelgeräten gut demonstriert werden kann.

Die Bedeutung des Generators für die Bereitstellung elektrischer Energie kann nicht hoch genug veranschlagt werden. Entscheidend beeinflusst wurde die Entwicklung 1866 durch die Entdeckung des dynamo-elektrischen Prinzips durch Werner von SIEMENS (1816 - 1892). Bei diesem Prinzip wird der in dem Weicheisenmagneten vorhandene Restmagnetismus durch Rückkoppelung zur Selbsterregung des Generators (ohne Permanentmagnet) benützt. Die erste Übertragung elektrischer Energie im technischen Maßstab erfolgte 1882 von München nach Miesbach. Von da an nahm die Entwicklung einen sehr raschen Verlauf. In vielen Städten begann die Versorgung mit elektrischer Energie in den letzten Jahren des neunzehnten Jahrhunderts.

6.2 Der Transformator

Um die Funktionsweise des Transformators verstehen zu können, muss auf den Grundversuch der Induktion zurückgegriffen werden. Ein wichtiges Versuchsergebnis besteht darin, dass nur so lange in der Induktionsspule eine elektrische Spannung erzeugt wird, wie sich das Magnetfeld in der Feldspule und damit auch (aufgrund der magnetischen Kopplung beider Spulen) in der Induktionsspule ändert. Dies ist nur beim Ein- und

Ausschaltvorgang der Fall. Soll in der Induktionsspule dauernd eine Spannung erzeugt werden, so ist dies z.B. dadurch möglich, dass der Elektronenstrom in der Feldspule mit Hilfe eines Schalters ständig ein- und ausgeschaltet wird.

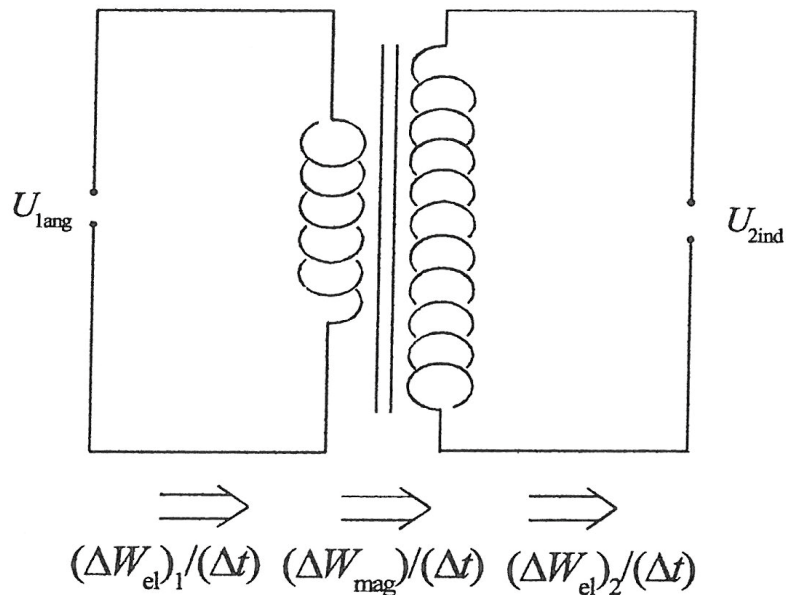


Abb. 4.6.2: Zum grundsätzlichen Aufbau des Transformators. Die beiden Spulen sind elektrisch getrennt, jedoch magnetisch durch den Eisenkern miteinander verbunden. Es lassen sich drei Energieströme unterscheiden: Ein elektrischer Energiestrom von der äußeren Quelle zur Primärspule, ein magnetischer Energiestrom über den Eisenkern von der Primär- zur Sekundärspule und ein weiterer elektrischer Energiestrom von der Sekundärspule zum angeschlossenen Elektrogerät.

Dieses unbefriedigende Verfahren kann verbessert werden, wenn man bedenkt, dass der für das Zustandekommen der Induktion entscheidende Vorgang die Änderung des Magnetfeldes im Inneren der Spule ist. Eine Möglichkeit dazu bestünde darin, die Induktionsspule - bei konstantem Elektronenstrom in der

Feldspule - ständig auf den Eisenkern zu schieben und wieder herunterzuziehen. Sehr viel leichter lässt sich die Änderung des Magnetfeldes erreichen, wenn an die Feldspule eine Wechselspannung angelegt wird. Geschieht dies, so ist an der Induktionsspule dauernd eine sich im Rhythmus des Magnetfeldes der Feldspule ändernde Spannung verfügbar. Ein Transformator muss also mit Wechselspannung betrieben werden und liefert wieder eine Wechselspannung. Um zu möglichst übersichtlichen Beziehungen für die am Transformator wirkenden Spannungen und Elektronenströme zu gelangen, betrachtet man zwei Grenzfälle, den Transformator im Leerlauf (den Fall, dass an der Sekundärseite kein Elektrogerät angeschlossen ist, somit keine Energie entnommen wird), und den Transformator im Kurzschluss, also den Fall, dass an der Sekundärseite ein Elektrogerät mit verschwindend kleinem Ohm'schen Widerstand liegt.

Didaktischer Hinweis

Der Transformator ist das für die Übertragung elektrischer Energie wesentliche Bauteil. Die Vorgänge bei Betrieb des Transformators sind sehr kompliziert, eine Darstellung für den Unterricht muss sich daher auf die Grundlagen beschränken. Zunächst ist es wichtig, den Schülern zu verdeutlichen, wie der Transformator aus der Faraday'schen Grundanordnung heraus entwickelt werden kann. Im Grundversuch der Induktion liegen zwei Spulen hintereinander, ein eingeschobener Eisenkern sorgt dafür, dass der magnetische Fluss (bzw. ein Teil von ihm) von der Feldspule zur Induktionsspule gelangt. Um eine möglichst vollständige Übertragung des magnetischen Flusses zu gewährleisten, formt man den Eisenkern gemäß einer geschlossenen Kurve um. Den beim Grundversuch geraden Eisenkern kann man sich dabei umgebogen denken, auf jedem seiner Äste liegt eine der beiden Spulen, dann wird der Kern oben durch ein aufgelegtes Joch geschlossen. Auf diese Weise kann sich der Schüler die Entstehung des im Unterricht verwendeten Transformators (bestehend aus Aufbauteilen) aus der Apparatur

des Grundversuches heraus vorstellen. Weiter ist wichtig, den Schülern bewusst zu machen, dass Feld- und Induktionsspule elektrisch getrennt - aber über den Eisenkern magnetisch gekoppelt - sind. Hilfreich ist dabei eine Betrachtung des Energieflusses am Transformator, wobei insgesamt drei Energieströme zu unterscheiden sind. Der erste Energiestrom ist ein elektrischer, er fließt von der elektrischen Quelle in die Feldspule (Primärspule) und erzeugt dort ein sich im Laufe der Zeit änderndes Magnetfeld. Der zweite Energiestrom ist magnetischer Art, im geschlossenen Eisenkern wird Energie durch das Magnetfeld von der Primärspule auf die Induktionsspule (Sekundärspule) übertragen. In der Sekundärspule wird durch Induktion die magnetische Energie in elektrische Energie umgewandelt, es kann elektrische Energie von der Sekundärspule zum außen angeschlossenen Elektrogerät fließen, was den dritten Energiestrom darstellt.

6.2.1 Der Transformator im Leerlauf

Prinzipiell gesehen besteht ein Transformator aus zwei Spulen - einer Feld- und einer Induktionsspule - welche über einen geschlossenen Eisenkern magnetisch miteinander verbunden sind. Ziel der Überlegung ist es, dem Schüler zu demonstrieren, dass mit dem Transformator Wechselspannungen leicht verändert werden können, und zwar lassen sich Wechselspannungen mit dem Transformator vergrößern oder verkleinern. Liegt an der Primärspule die Wechselspannung U_{lang} , so entsteht aufgrund der Eigeninduktivität der Primärspule an ihren Enden die Induktionsspannung U_{ind} , es gilt:

$$U_{\text{ind}} = - n_1 (\Delta \Phi) / (\Delta t) .$$

Diese Induktionsspannung ist der angelegten Spannung entgegengesetzt gleich, es gilt:

$$U_{\text{ind}} = - U_{\text{lang}} .$$

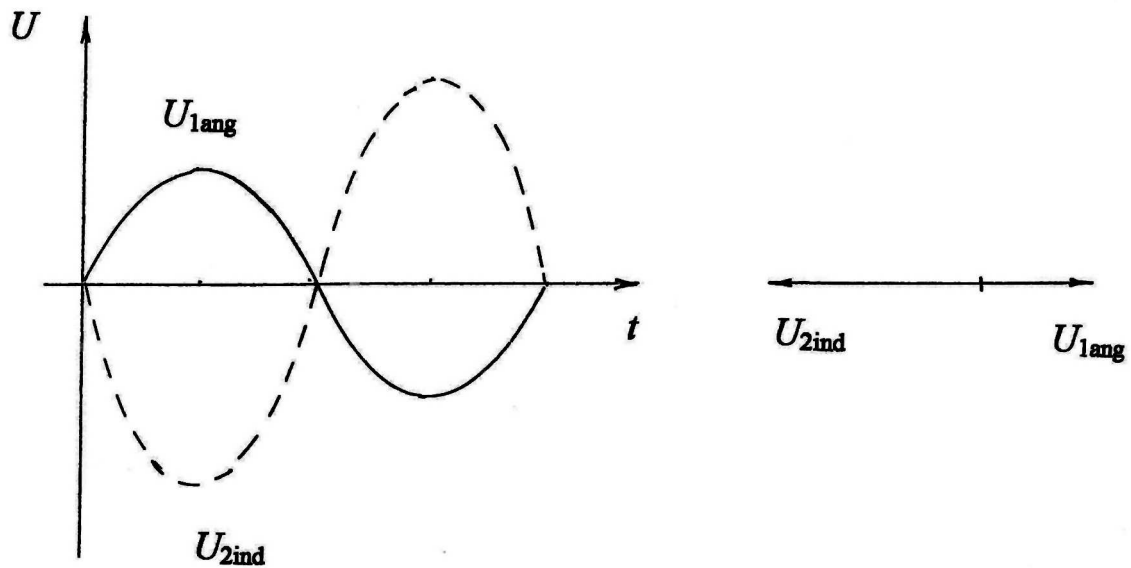


Abb. 4.6.3: Zum Vorzeichen der Spannungen am Transformator an Primär- und Sekundärseite. Die induzierte Spannung ist gegenüber der angelegten Spannung um 180° phasenverschoben. Das Ergebnis kann durch eine Zeigerdarstellung veranschaulicht werden. Eine Deutung ist mit Hilfe der Eigeninduktivität und des Induktionsgesetzes möglich.

Somit ergibt sich:

$$U_{1\text{ang}} = n_1 (\Delta\Phi) / (\Delta t) .$$

Für die in der Sekundärspule induzierte Spannung gilt nach dem Induktionsgesetz:

$$U_{2\text{ind}} = - n_2 (\Delta\Phi) / (\Delta t) .$$

Aus diesen beiden Beziehungen folgt durch Division:

$$\boxed{U_{2\text{ind}} / U_{1\text{ang}} = - (n_2 / n_1) .}$$

Die Gleichung besagt, dass sich die am Transformator liegenden Spannungen wie die Windungszahlen ihrer Spulen verhalten, d.h. man kann mit dem Transformator Wechselspannungen im Verhältnis der Windungszahlen der beiden Spulen verändern. Für Schüler kann folgende konkrete Formulierung hilfreich sein:

Wenn die Ausgangsspannung am Transformator 100 mal so groß sein soll wie die Eingangsspannung an der Primärspule, so muss die Windungszahl der Sekundärspule 100 mal so groß sein wie die Windungszahl der Primärspule (Entsprechendes gilt für die Spannungsverkleinerung).

Das negative Vorzeichen in der obigen Gleichung bedeutet, dass bei sinusförmigem Spannungsverlauf die Spannung an der Sekundärseite um 180° phasenverschoben ist gegenüber der Spannung an der Primärseite.

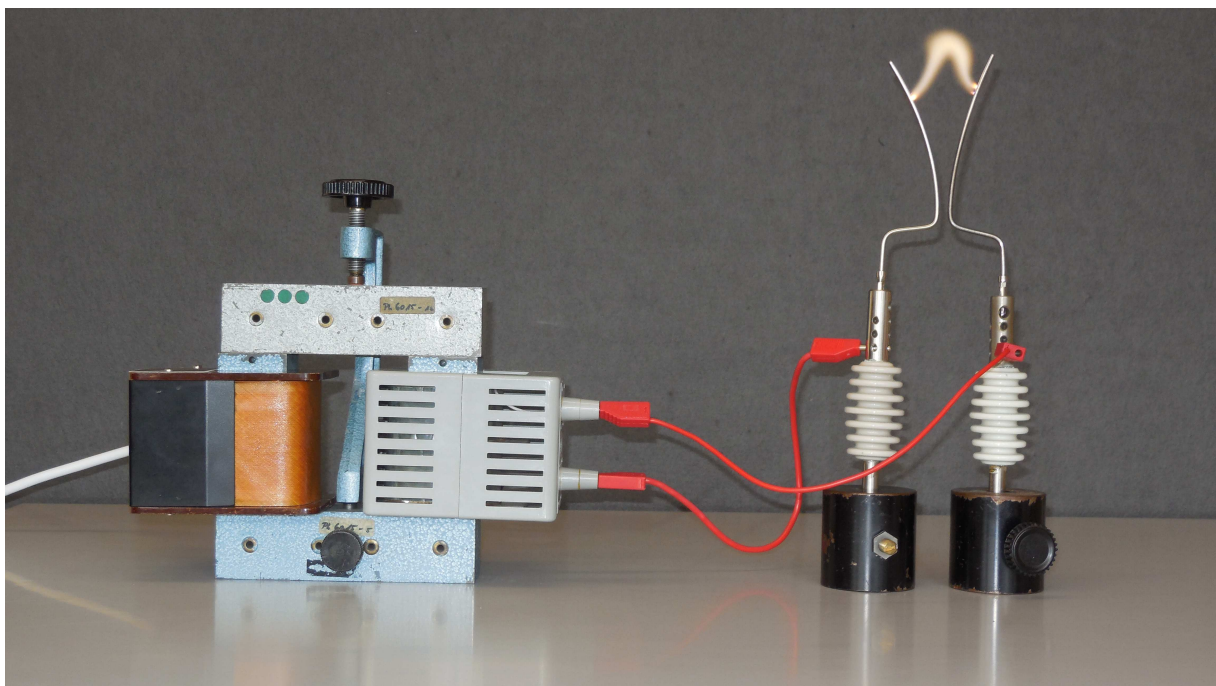


Abb. 4.6.4: Hochspannungstransformator (**Lebensgefahr!**).

Eine Primärspule ($n = 500$) wird an Netzspannung (230 V) angeschlossen. Die Spule sollte wegen einer möglichen Überlastung nur kurzzeitig betrieben werden. An der Sekundärspule ($n = 23000$) entsteht eine Hochspannung von 10 000 V. Der Versuch ist **lebensgefährlich**.

Die Veränderungen von Wechselspannungen mit Hilfe des Transformators lassen sich durch eindrucksvolle Versuche demonstrieren. So kann über ein Netzgerät (und ein geeignetes Übersetzungsverhältnis) eine normale Glühlampe (Betriebsspannung 230 V) mit 2 V Wechselspannung betrieben werden. Umgekehrt lässt sich eine Kleinglühlampe (Betriebsspannung 2 V) über einen Transformator an Netzspannung anschließen (Anwendung beim Klingeltrafo). Die Herstellung einer Hochspannung von 10 kV - **Lebensgefahr!** - ($n_1 = 500$; $n_2 = 23000$) ist möglich, wenn man die Primärspule an die Netzspannung anschließt. Über gebogene Elektroden erfolgt eine Funkenentladung an der Sekundärseite.

Methodische Anmerkung

Zur Erarbeitung des dargestellten Zusammenhanges zwischen Spannungen und Windungszahlen der Spulen beim Transformator im Leerlauf wird man im Unterricht der Sekundarstufe I wohl die induktive Methode wählen. In mehreren Versuchsreihen variiert man die Windungszahlen von Primär- und Sekundärspulen und misst die dazugehörigen Spannungen. Die geordnete Zusammenfassung der Messwerte ist für die Schüler leicht zu bewerkstelligen. Man erhält das nachfolgende Resultat.

Experimentelles Ergebnis:

Mit dem Transformator kann man Wechselspannungen vergrößern oder verkleinern. An der Spule mit der größeren Windungszahl liegt die größere Spannung.

Ein anschließender Schritt führt zu dem folgenden quantitativen

Ergebnis: Die Spannungen an den beiden Spulen des Transformators verhalten sich wie die dazugehörigen Windungszahlen der Spulen.

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der gefundenen Beziehung reichen vom eindrucksvollen Hochspannungstransformator (Lebensgefahr!) über den

Klingeltransformator zu den Ladegeräten für Apparate des Alltags (beispielsweise für das Mobiltelefon),

Hinweis zum Energieumsatz

Beim Betrieb des Transformators im Leerlauf wird auf der Sekundärseite keine Energie entnommen. Nach dem Energiesatz ist dann zu erwarten, dass auch auf der Primärseite kein Energieumsatz statt findet. Hier stößt man zunächst auf ein Problem, denn die Primärspule ist an eine elektrische Quelle angeschlossen, an der Primärspule liegt die Eingangsspannung und durch die Primärspule fließt ein Elektronenstrom (welcher durch das ihn begleitende Magnetfeld für die Entstehung der Induktionsspannung an der Sekundärspule sorgt). Auf Grund dieser Beschreibung könnte man vermuten, dass in der Primärspule eine Energieumsetzung erfolgt. Dies ist jedoch nicht der Fall, wie uns die Wechselstromlehre zeigt. Setzen wir voraus, dass der Ohm'sche Widerstand in der Primärspule verschwindend klein ist, so hinkt in der Primärspule der Elektronenstrom der angelegten Spannung um 90° nach, es handelt sich um einen so genannten „Blindstrom“. Als Folge dieser Phasenverschiebung ergibt sich, dass die Primärspule keine Energie aus der angelegten elektrischen Quelle aufnimmt - unter den angenommenen idealisierten Bedingungen. Die eingangs angestellte Überlegung auf der Grundlage des Energiesatzes kann also mit Hilfe der Wechselstromlehre bestätigt werden.

Ergänzend sei darauf aufmerksam gemacht, dass beim Betrieb des Transformators im Kurzschluss oder beim Betrieb eines an der Sekundärseite angeschlossenen Elektrogerätes die Sachlage schwieriger wird. In diesem Fall wird auf der Sekundärseite Energie nach außen abgegeben, und diese Energie muss von derjenigen elektrischen Quelle geliefert werden, an welche die Primärspule angeschlossen ist. Nach der Wechselstromlehre geschieht diese Energieübertragung durch einen „Wirkstrom“, welcher zusätzlich zum „Blindstrom“ durch die Primärspule fließt und welcher mit der an der Primärspule liegenden Spannung in gleicher Phase

verläuft. Dieser Energiestrom kann in bekannter Weise über das Produkt aus der angelegten Spannung und dem Elektronenstrom durch die Primärspule bestimmt werden. Im Idealfall (eines verlustfreien Transformators) ist dies gleich demjenigen Energiestrom, welcher auf der Sekundärseite des Transformators zum angeschlossenen Elektrogerät strömt.

6.2.2 Der Transformator im Kurzschluss

Der für den Transformator wichtige zweite Grenzfall ist (nach der Betrachtung des Betriebs im Leerlauf) der Betrieb im Kurzschluss. Realisiert wird dies durch den Anschluss eines Gerätes mit sehr kleinem Ohm'schen Widerstand auf der Sekundärseite des Transformators. Als Schauversuch dient ein Transformator mit dem Windungsverhältnis $n_1 : n_2 = 500 : 5$, welcher primärseitig an Netzspannung angeschlossen ist. Die Windungen der Sekundärseite bestehen aus sehr dicken metallischen Leitungen (Durchmesser 1 cm), an deren Enden ein Eisennagel (Durchmesser 4 mm) als „Elektrogerät“ angeschlossen ist. Bei Betrieb beträgt in der Primärspule die Stromstärke etwa 1 A, im Sekundärkreis ungefähr 100 A, was zum Glühen und nach einiger Zeit zum Durchschmelzen des Nagels führt.

Die Besonderheit des Versuches besteht darin, dass bei der Sekundärspule die Übertragung eines großen Energiestromes auf das "Elektrogerät Nagel" nur dadurch möglich ist, dass auf der Primärseite zusätzlich zu dem ohnehin bestehenden Blindstrom ein elektrischer Wirkstrom fließt, welcher zu der von außen angelegten Spannung (U_{lang}) in Phase ist. Dieser Wirkstrom I_1 ist betragsmäßig deutlich größer als der Blindstrom und hat einen zusätzlichen magnetischen Fluss Φ_1 zur Folge, für welchen gilt:

$$\Phi_1 = B_1 A = \mu_r \mu_0 (n_1 / l) A I_1$$

$$\Phi_1 = \text{const. } n_1 I_1 .$$

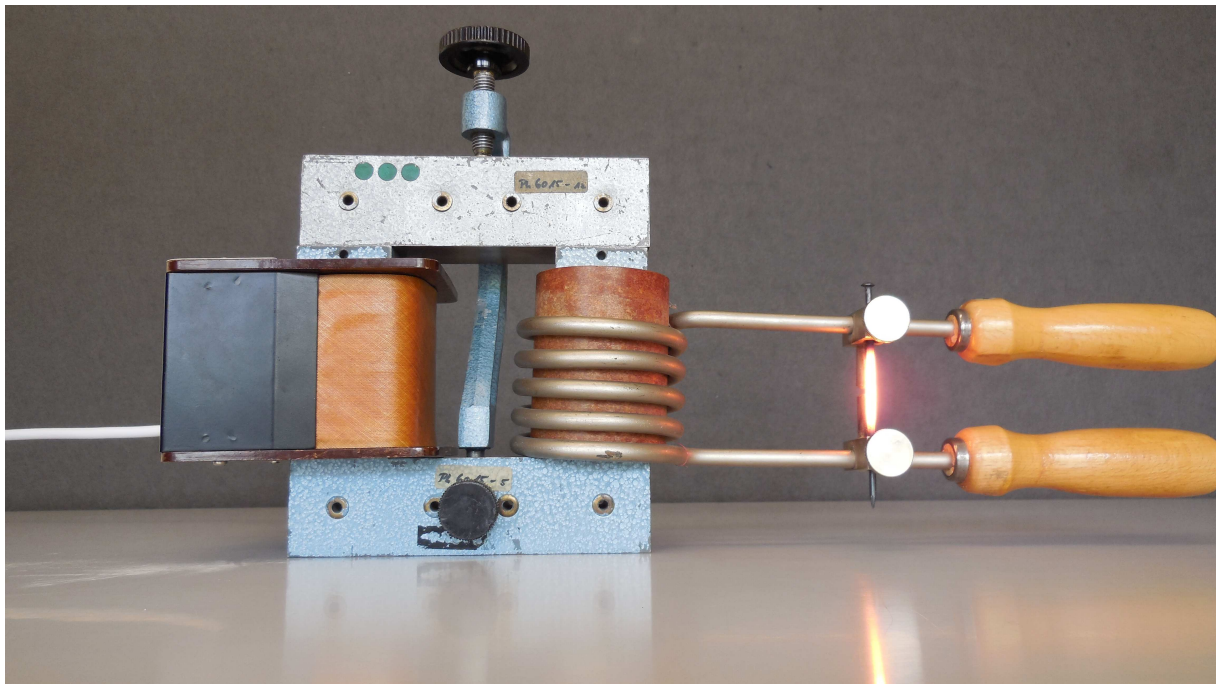


Abb. 4.6.5: Hochstromtransformator, zusammengesetzt aus Aufbauteilen. Bei einem Transformator mit dem Windungszahlverhältnis 500 : 5 wird die an der Primärspule anliegende Netzspannung auf 2 V herunter transformiert. Die 5 Windungen der Sekundärspule bestehen aus dicken Eisendrähten (besitzen somit einen sehr kleinen Ohm'schen Widerstand). Als „Elektrogerät“ wird ein Nagel von verhältnismäßig kleinem Durchmesser angeschlossen - er besitzt also im Vergleich zu den Wicklungen der Sekundärspule einen relativ großen Ohm'schen Widerstand. Damit haben wir im Sekundärkreis eine Reihenschaltung unterschiedlich großer Ohm'scher Widerstände, und folglich fließt nach den diesbezüglichen Gesetzen an jeder Stelle in diesem Leiterkreis der gleiche Elektronenstrom. Die Konsequenz davon ist, dass die entstehende Joule'sche Wärme ($W = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$) im Nagel deutlich größer ist als in den dicken Wicklungen der Sekundärspule - der Nagel beginnt zu glühen und schmilzt durch.

Nach dem Induktionsgesetz verursacht der magnetische Fluss Φ_1 in der Sekundärspule einen magnetischen Fluss Φ_2 , welcher dem Fluss Φ_1 entgegengesetzt gleich gerichtet sein muss, es gilt:

$$\Phi_2 = -\Phi_1 .$$

Ist für beide Spulen die Querschnittsfläche A und die Länge l gleich, so gilt für Φ_2 :

$$\Phi_2 = B_2 A = \mu_r \mu_0 (n_2 / l) A I_2$$

$$\Phi_2 = \text{const. } n_2 I_2 .$$

Setzt man die Ausdrücke für Φ_1 und Φ_2 gleich, so ergibt sich für die Wirkströme in beiden Spulen:

$$\text{const. } n_1 I_1 = -\text{const. } n_2 I_2 .$$

$I_2 / I_1 = -(n_1 / n_2) .$

Beim belasteten Transformator verhalten sich also die Wirkströme im Primär- und im Sekundärkreis umgekehrt wie die dazugehörigen Windungszahlen. Das negative Vorzeichen besagt, dass die beiden sinusförmigen Elektronenströme um 180° phasenverschoben sind.

Das Ergebnis kann auch mit dem Energiesatz interpretiert werden, denn auf der Sekundärseite kann im Idealfall nur diejenige Energie entnommen werden, welche primärseitig eingegeben wird. Die pro Zeiteinheit umgesetzte Energie, also der Energiestrom, ist durch

$$\begin{aligned} \Delta W / \Delta t &= P \\ P &= U \cdot I \end{aligned}$$

bestimmt. Angewandt auf den Transformator kann der Energiesatz damit auch folgendermaßen formuliert werden:

Bei verlustfreiem Betrieb des Transformators ist der auf der Sekundärseite entnommene Energiestrom genau so groß wie der an der Primärseite eingespeiste Energiestrom, bzw. der Energiestrom durch den idealen Transformator ist konstant.

Im betrachteten Fall wird die Spannung auf der Sekundärseite verkleinert, was - unter den genannten Bedingungen - eine Vergrößerung des Elektronenstromes auf der Sekundärseite zur Folge hat.

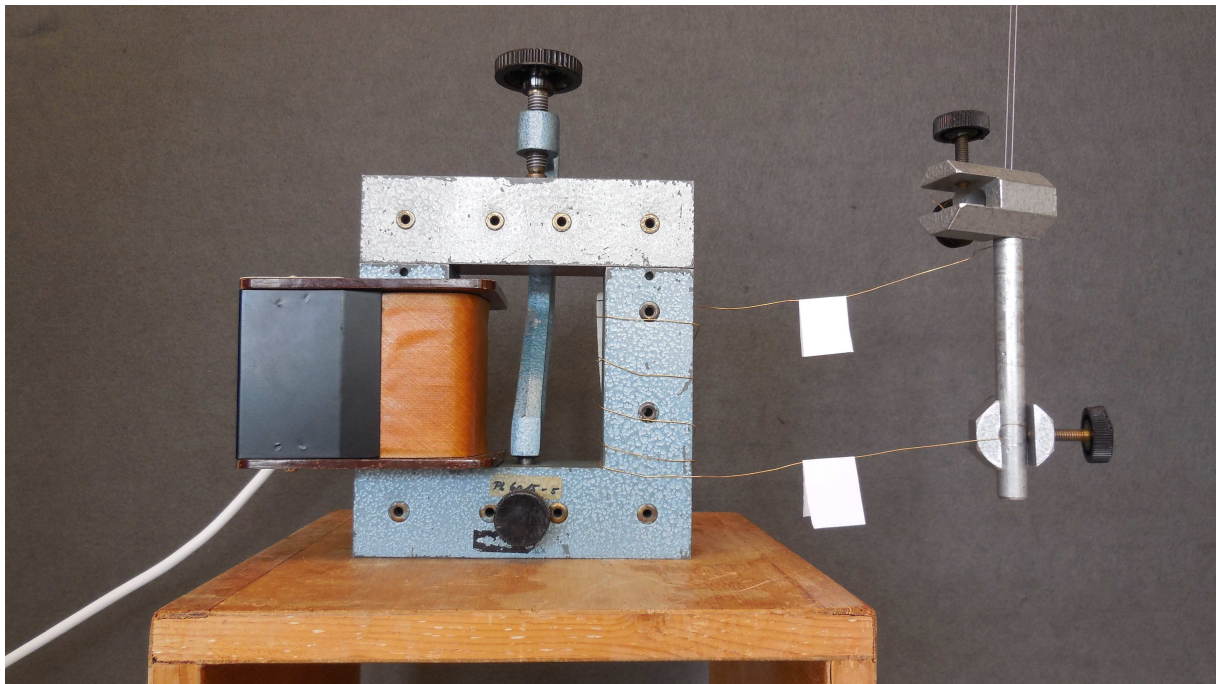


Abb. 4.6.6: Ergänzung zum Hochstromversuch.

Der im Hochstromversuch verwendete Nagel wird hier durch einen Stativstab ersetzt (mit sehr kleinem Ohm'schen Widerstand), die dicken Wicklungen der Sekundärspule durch Wicklungen aus einem dünnen Eisendraht (vergleichsweise dazu mit relativ großem Ohm'schen Widerstand). Da im Sekundärkreis der Elektronenstrom an jeder Stelle gleich groß ist, so ist die Joule'sche Wärme, welche in den dünnen Wicklungen der Sekundärspule entsteht, viel größer als im Stativstab - die Wicklungen brennen nach kurzer Zeit durch.

Didaktischer Hinweis

Es ist angebracht, mit den Schülern die Frage zu erörtern, warum bei dem geschilderten Hochstromversuch der Nagel schmilzt und nicht die Leitungen im Sekundärkreis. Der Grund liegt darin, dass sich der größte Teil der Joule'schen Wärme dort entwickelt, wo der elektrische Widerstand im Leiterkreis besonders groß ist. Hat der Nagel einen kleineren Querschnitt als die Zuleitungen im Sekundärkreis, so ist sein elektrischer Widerstand größer und damit entsteht bei ihm bevorzugt die Wärmeentwicklung. Die Situation lässt sich umkehren, wenn man die Zuleitungen aus dünnem Draht gestaltet und statt des Nagels einen Stativstab in den Sekundärkreis schaltet. In diesem Fall schmelzen die Zuleitungen durch, der Stativstab bleibt unversehrt.

Weiter lässt sich aus dem geschilderten Versuch noch eine interessante Erkenntnis ableiten. Da beim Schmelzen des Nagels ein sehr großer Elektronenstrom fließt, so könnte ein Schüler auf den Gedanken kommen, dass beim Austauschen des Nagels durch ein Glühlämpchen (2V / 0,1 A) dieses sofort durchschmelzen müsste. Der Versuch zeigt jedoch (zur größten Überraschung der Schüler), dass dies nicht der Fall ist: Man kann mit derselben Apparatur, mit welcher man den Nagel zum Schmelzen bringt, ein Glühlämpchen ohne Schaden betreiben. Im einen Fall fließt im Sekundärkreis ein Elektronenstrom von 100 A, im anderen Fall von 0,1 A. Das überraschende Ergebnis kann gedeutet werden, wenn man die Steuerung des Energiestromes betrachtet. Entscheidend ist die Erkenntnis, dass das auf der Sekundärseite des Transformators angeschlossene Elektrogerät die Größe des Energiestromes auch auf der Primärseite festlegt, d.h. der Endabnehmer der Energie bestimmt den Energiestrom, den der Energielieferant (hier die Quelle auf der Primärseite) abgeben muss. Der Nagel braucht einen großen Energiestrom, das Glühlämpchen nur einen kleinen. Bei dieser Aussage wird vorausgesetzt, dass der Energielieferant in der Lage ist, stets denjenigen Energiestrom zu liefern, den der Abnehmer verlangt;

diese Bedingung ist bei Anschluss an das (elektrische Energieversorgungs-) Netz erfüllt.

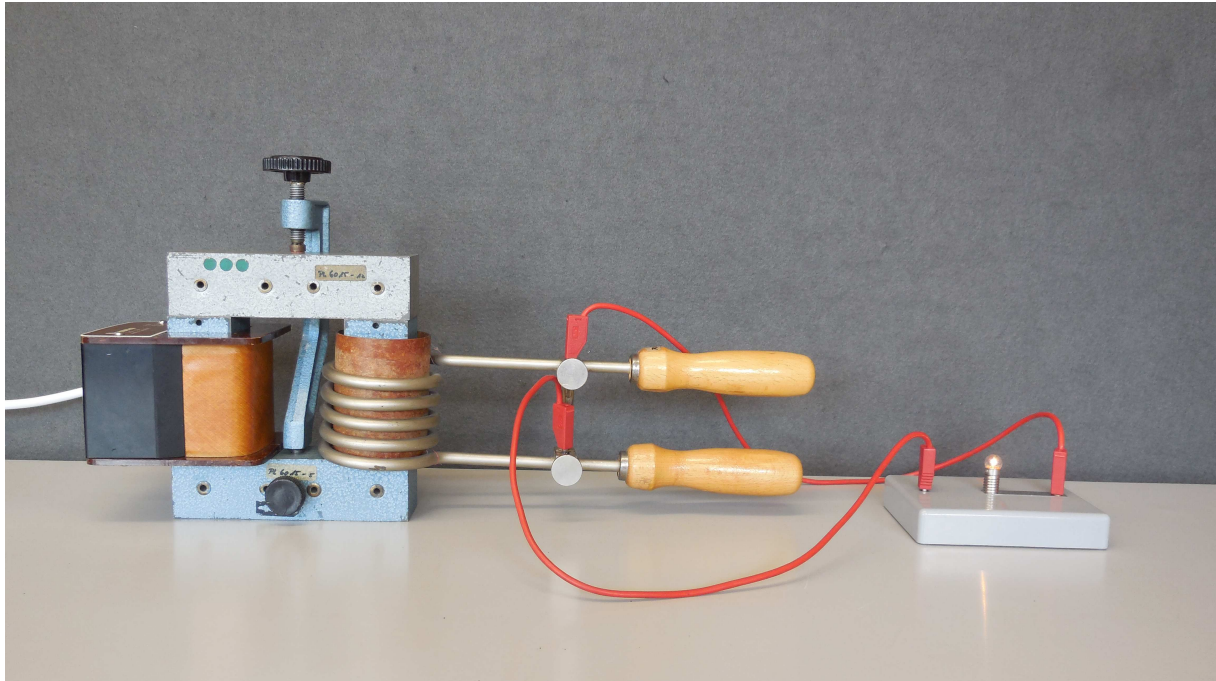


Abb. 4.6.7: Weitere Ergänzung zum Hochstromversuch.

Der Versuch soll demonstrieren, dass der gesamte Energiestrom im Transformator durch den maximal möglichen **Energiestrom im Sekundärkreis** festgelegt wird (und nicht, wie man vielleicht vermuten könnte, durch den Energiestrom im Primärkreis).

Man geht aus von der Apparatur des Hochstromversuches. An die Stelle des Nagels wird jetzt im Sekundärkreis ein Glühlämpchen (2 V / 0,1 A) angeschlossen. Das Lämpchen leuchtet normal, es nimmt keinen Schaden. Dieses überraschende Ergebnis ist dadurch zu erklären, dass der durch den gesamten Transformator fließende Energiestrom von dem im Sekundärkreis liegende Elektrogerät festgelegt wird. Der in diesem Gerät maximal mögliche Energiestrom ist gleich dem Energiestrom durch den gesamten Transformator. Im vorliegenden Fall beträgt der Energiestrom im Sekundärkreis 0,2 W. Dagegen beläuft sich beim Hochstromversuch der maximale Energiestrom im Sekundärkreis auf ungefähr 200 W, ist also 1000 – mal so groß.

Methodische Anmerkung

Der hier vorgestellte Weg zur Erarbeitung eines Zusammenhanges zwischen den Elektronenströmen und den Windungszahlen bei einem Transformator im Kurzschluss richtet sich an Lehramtsstudenten und setzt Kenntnisse voraus, welche bei Schülern der Sekundarstufe I nicht vorliegen. Eine für diesen Adressatenkreis mögliche Vorgehensweise im Unterricht sei nachfolgend skizziert.

Methode 1

Dieser Weg ist die induktive Methode. Man schließt an die Sekundärspule des Transformators ein Gerät mit kleinem Ohm'schen Widerstand an und misst die Elektronenströme in Primär- und Sekundärspule. Aus den Messdaten kann das Ergebnis erschlossen und formuliert werden.

Experimentelles Ergebnis:

Beim belasteten Transformator verhalten sich die Elektronenströme in den Spulen umgekehrt wie die Windungszahlen der betreffenden Spulen.

Der Hochstromversuch bestätigt dieses Ergebnis in nachdrücklicher Weise.

Methode 2

Hier wählt man die deduktive Methode. Dazu wendet man den Energiesatz auf den belasteten Transformator an, und zwar in einer etwas modifizierten Form: Man betrachtet nicht die Energie selbst, sondern die bei diesem Vorgang auftretenden Energieströme; weiter setzt man voraus, dass bei den vorliegenden Prozessen keine Energieverluste auftreten. Es ergibt sich das nachfolgend beschriebene Bild.

Es fließt ein bestimmter „Energiestrom 1“ vom Elektrizitätswerk über die Steckdose in die Primärspule hinein. Dieser „Energiestrom 1“ soll verlustfrei über den Eisenkern des Transformators zur Sekundärspule weiter geleitet werden. Von der Sekundärspule wird dieser - unverändert große -

Energiestrom an das außen liegende Elektrogerät abgegeben („Energiestrom 2“).

Es gilt dann:

$$\begin{aligned} (\text{Energiestrom 1}) &= U_1 \cdot I_1 \\ (\text{Energiestrom 2}) &= U_2 \cdot I_2 . \end{aligned}$$

$$(\text{Energiestrom 1}) = (\text{Energiestrom 2})$$

$$\boxed{U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 .}$$

Beide Energieströme sind (unter den hier getroffenen Voraussetzungen) gleich groß. Daraus ergibt sich, dass sich die Elektronenströme in den beiden Spulen umgekehrt verhalten müssen wie die dazu gehörigen Spannungen und folglich auch wie die dazu gehörigen Windungszahlen der Spulen. Wenn also bei einem Transformator die Spannung in der Sekundärspule vergrößert wird, so muss gleichzeitig in der Sekundärspule der Elektronenstrom kleiner werden.

In anschließenden Messreihen kann dieses - aus dem vorhandenen Wissen hergeleitete - Ergebnis für die Schüler überzeugend bestätigt werden.

V. Elektrische und magnetische Felder sind Träger von Energie

Die beiden nachfolgend genannten Beispiele mögen als Hinführung zum Thema dieses Kapitels - elektrische und magnetische Felder können als Träger von Energie angesehen werden - dienen.

Betrachtet man den Vorgang, mit welchem der Motor eines Fahrzeuges in Gang gesetzt wird, so ist folgende Überlegung einsichtig: Zum Anlassen des Motors benötigt man Energie, und zwar in mechanischer Form. Diese Energie kann nur von der Batterie des Fahrzeuges stammen, sie treibt den elektrischen Anlasser (also einen Elektromotor) und dieser startet den Motor. Daraus ergibt sich, dass in der Batterie Energie in elektrischer Form gespeichert sein muss. Allgemein betrachtet kann man die funktionsfähige Batterie eines Autos mit einem geladenen Kondensator vergleichen, den man sich - vereinfacht betrachtet - als Plattenkondensator vorstellen kann. Zwischen den Platten eines geladenen Kondensators bildet sich ein elektrisches Feld aus, und man kann begründet vermuten, dass dieses elektrische Feld den Träger der hier in den Blick gefassten Energie darstellt.

Ähnlich ist die Lage im magnetischen Fall. Auf einem Schrottplatz kann ein Kran mit Hilfe eines Elektromagneten schwere Eisenteile vom Boden hochheben. Zu diesem Vorgang ist Energie nötig, und diese kann nur von dem benutzten Elektromagneten stammen. Eine ähnliche Betrachtung liefert ein Versuch mit einem Hufeisenmagneten aus der physikalischen Sammlung. Die Pole des Magneten sind durch eine Eisenplatte überbrückt; zum Abziehen der Platte ist ein nicht unerheblicher Energieaufwand erforderlich. Aus dieser experimentellen Erfahrung muss der Schluss gezogen werden, dass in einem Magnetfeld Energie gespeichert ist.

Nachfolgend wird dargestellt, wie die in elektrischen und magnetischen Feldern vorhandene Energie am Beispiel übersichtlicher Sonderfälle quantitativ beschrieben werden kann.

1. Die Energie des elektrischen Feldes

Die Herleitung einer quantitativen Beziehung für die Energie des elektrischen Feldes soll in der nachfolgenden Betrachtung in zwei Schritten erfolgen. In einem ersten Schritt wird durch einen qualitativen Vorversuch demonstriert, dass das elektrische Feld Träger von Energie sein muss. In einem zweiten Schritt wird dann an Hand eines relativ leicht zu behandelnden Sonderfalles des elektrischen Feldes dessen Energie quantitativ beschrieben. Abgerundet wird die Betrachtung durch die Heranziehung eines Messverfahrens, welches die experimentelle Ermittlung der Energie des elektrischen Feldes erlaubt. Damit besteht eine Prüfung der theoretischen Überlegungen durch das Experiment.

Qualitativer Versuch

In diesem Versuch wird gezeigt, dass ein elektrisches Feld als Träger von Energie angesehen werden kann. Zur Demonstration dient ein Kondensator, dessen Kapazität für schulische Belange gesehen sehr groß ist ($C = 100 \mu\text{F}$). Dieser Kondensator wird mit einer Spannung von ungefähr 1000 V geladen (Vorsicht, **Lebensgefahr!**) und dann vom Netzgerät abgetrennt. Unter größter Vorsicht (gut isolierende Lederhandschuhe oder Holzzange benutzen) wird dann der geladene Kondensator kurzgeschlossen. Die Folge ist eine elektrische Entladung, die von einem sehr starken Knall begleitet wird; dieser entsteht durch die Erhitzung der umgebenden Luft und deren schlagartiger Ausdehnung, womit gezeigt wird, dass Energie frei gesetzt wurde. Diese Energie kann nur von dem Kondensator stammen. Der Versuch kann somit als Bestätigung dafür angesehen werden, dass das elektrische Feld des geladenen Kondensators Träger von Energie ist.



Abb. 5.1.1: Versuch zur qualitativen Demonstration der in einem elektrischen Feld gespeicherten Energie. Ein Kondensator der Kapazität $100 \mu\text{F}$ wird mit einer Spannung von 1000 V aufgeladen (Vorsicht, **Lebensgefahr!**). Dann wird der Kondensator kurz geschlossen (Zum Halten des Kabels benütze man eine gut isolierende Holzspanne). Als Folge der elektrischen Entladung erwärmt sich die umgebende Luft schlagartig - die Energie des elektrischen Feldes wird in thermische Energie umgewandelt, es entsteht ein lauter Knall.

Quantitative Beschreibung

Die geschilderte Überlegung bei dem vorgenannten qualitativen Versuch eröffnet eine prinzipielle Messmöglichkeit für die Energie eines elektrischen Feldes. Erfolgt die Entladung des Kondensators über einen Draht, welcher in einem Glasgefäß eingeschmolzen ist und befindet sich an dem Gefäß ein Manometer, so kann aus dem Druckanstieg mit Hilfe der Gasgesetze die Temperaturerhöhung der eingeschlossenen Luftmenge und damit die Größe der zugeführten Energie bestimmt werden. Wenn man (bei idealisierter Betrachtungsweise) Energieverluste ausschließt, so ist die so bestimmte Energie gleich der Energie des elektrischen Feldes. Das Verfahren ist also geeignet, auf experimentellem Wege die Energie eines elektrischen Feldes zu ermitteln.

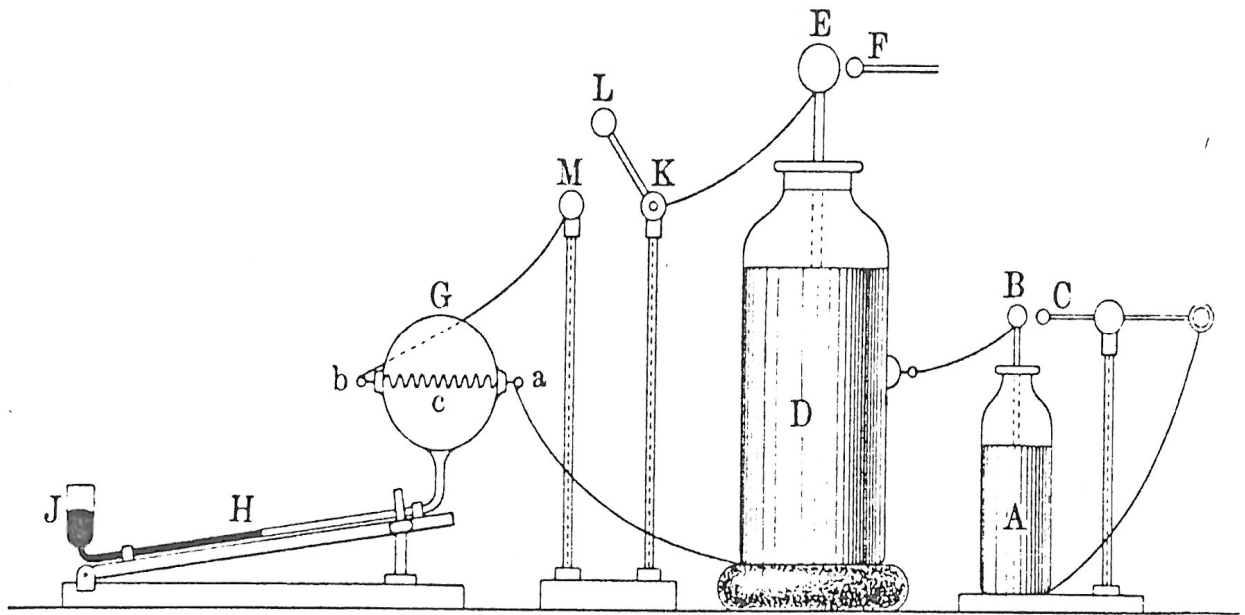


Abb. 5.1.2: Zur Messung der Energie des elektrischen Feldes über die Entladung eines Kondensators (nach LA COUR / APPEL). Die Leidener Flasche (D) wird durch Kontakt der beiden Kugeln L und M entladen, der Draht (a - b) in dem Glaskolben erwärmt die enthaltene Luft. Aus der am Manometer J-H messbaren Druckzunahme kann die Temperaturerhöhung der Luft und daraus die freigesetzte Energie bestimmt werden.

Eine theoretische Bestimmung der Energie des elektrischen Feldes ist für den Sonderfall des homogenen Feldes, wie es z.B. beim Plattenkondensator besteht, ohne Schwierigkeiten möglich. Man greift zurück auf die für den Unterricht zweckmäßige Definition der elektrischen Spannung als Quotient aus der zur Ladungstrennung erforderlichen Energie und der Größe der getrennten Ladung

$$U = (\Delta W)_{\text{el}} / \Delta Q$$

und löst diese Beziehung nach der Energie auf. Es ergibt sich:

$$(\Delta W)_{\text{el}} = U \cdot (\Delta Q).$$

Im Falle des homogenen Feldes des Plattenkondensators gilt für den Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung die Kondensatorgleichung

$$Q = C \cdot U, \text{ bzw. } (\Delta Q) = C \cdot (\Delta U).$$

Damit ergibt sich für die Energie des elektrischen Feldes:

$$(\Delta W)_{\text{el}} = C \cdot U \cdot (\Delta U).$$

Die Integration von der Spannung null bis zum Maximalwert der Spannung, der hier mit U bezeichnet werden soll, liefert:

$$W_{\text{el}} = (1/2) C U^2.$$

Dies ist die Energie für das homogene elektrische Feld des Plattenkondensators. Die Gleichung lässt sich umformen, wenn die speziellen Beziehungen für die Kapazität C und die Feldstärke des Plattenkondensators eingesetzt werden.

$$C = \epsilon_0 (A / d)$$

$$U = |\vec{E}| \cdot d.$$

(A = Fläche des Kondensators; d = Plattenabstand; U = am Kondensator angelegte Spannung; \vec{E} = elektrische Feldstärke zwischen den Platten; $V = A d$ = Volumen zwischen den Platten).

Mit diesen Beziehungen folgt für die Energie des elektrischen Feldes im Vakuum:

$$W_{\text{el}} = (1/2) \epsilon_0 |\vec{E}|^2 V,$$

bzw. für die betreffende Energiedichte

$$\boxed{(\Delta W)_{\text{el}} / (\Delta V) = (1/2) \epsilon_0 |\vec{E}|^2.}$$

Gemessen wird die Energiedichte im SI-System in der Einheit J m^{-3} . Die Beziehung gilt – wie erwähnt – für das Vakuum; befindet sich Materie im elektrischen Feld, so ist noch die Dielektrizitätszahl ϵ_r zu berücksichtigen.

Weiter ist anzumerken, dass die hier für den Sonderfall des homogenen Feldes hergeleitete Beziehung allgemeine Gültigkeit besitzt. Die oben beschriebene experimentelle Prüfbarkeit dieser Beziehung für die Energie des elektrischen Feldes ist für dieses Resultat eine wesentliche Stütze.

Hinweis

Die Energie, welche im elektrischen Feld gespeichert werden kann, ist außerordentlich klein. So beträgt die Energie, welche in einem Plattenkondensator aus Aufbauteilen (Plattenradius 11,97 cm; Plattenabstand 1 mm; Kapazität 400 pF; angelegte Spannung 6000 V) gespeichert werden kann, nur etwa 0,01 J (Energiedichte 160 J m^{-3}). Bei einer Kondensatorkapazität von 100 μF (was für ein Gerät einer Schulsammlung einen sehr großen Wert darstellt) und einer hier maximal zulässigen Spannung von 1000 V ergibt sich eine Energie von 50 J, ein ebenfalls nicht großer Wert. Anders ist es in diesem Fall mit der Energiedichte, welche bei der Entladung dieses Kondensators durch Kurzschluss mit starkem Knall in einem elektrischen Funken auftritt. Diese Energiedichte ist groß, weshalb bei dem Versuch wegen der damit verbundenen **Lebensgefahr** höchste Vorsicht geboten ist (es empfiehlt sich, die Kabel nur mit einer gut isolierenden Holzzange anzufassen).

Die elektrische Energie, welche im Akkumulator eines Personenwagens gespeichert werden kann, ist ebenfalls relativ klein; sie lässt sich aus den Angaben des Herstellers (z.B.: 12 V / 44 Ah) ohne Schwierigkeiten berechnen und beträgt etwa 2 MJ. Im Vergleich zur Energiedichte von Benzin (45 MJ kg^{-1} bzw. $35 \cdot 10^9 \text{ J m}^{-3}$) ist dies etwa ein Zehntel von diesem Wert. Weiter entspricht die gesamte in dem Akku gespeicherte elektrische Energie - unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades von Verbrennungsmotoren - der mechanisch nutzbaren Energie von 0,1 Liter Benzin.

Anmerkung

Abschließend sei noch eine Bemerkung zur grundlegenden Problematik bei der Versorgung mit elektrischer Energie durch die Elektrizitätswerke angefügt.

Für den Nutzer besitzt die elektrische Energie wegen ihrer vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten große Vorteile; sie besitzt jedoch einen großen Nachteil, der kurz dargestellt werden soll. Es handelt sich um das prinzipielle Phänomen, dass **elektrische Energie** in nennenswertem Umfang mit vertretbarem Aufwand nicht gespeichert werden kann. Dies hat für die großtechnische Versorgung mit elektrischer Energie **schwerwiegende Konsequenzen**. Die Elektrizitätswirtschaft kann auf Grund dieses Sachverhaltes eine Bevorratung von elektrischer Energie nicht durchführen; es muss deshalb ständig in jedem einzelnen Augenblick so viel elektrische Energie bereitgestellt werden wie es der Abnehmer verlangt. Dies wird durch dauernd in Betrieb befindliche Werke („Grundlast“) gewährleistet, denen bei Bedarf („Spitzenlast“) kurzfristig (also innerhalb von ungefähr einer Minute) weitere Generatoren hinzugeschaltet werden können. Erreicht wird dies durch gasbefeuerte Turbinen oder durch Speicherwerke im Gebirge. Letztere sind in der Regel als Pumpspeicherwerke ausgebildet, d.h. es gibt zwei oder mehrere Speicherbecken, welche bei Spitzenbedarf elektrische Energie liefern. Zu Zeiten geringen Energiebedarfs wird dann das Wasser von den tiefer gelegenen in die höheren Stauseen zurückgepumpt. Dies ist eine Form der Speicherung von Energie, bei welcher mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird und umgekehrt. Begleitet werden diese Umwandlungsprozesse von nicht unerheblichen Energieverlusten.

Eine weitere Konsequenz der genannten Problematik hinsichtlich der Energiespeicherung betrifft die Bereitstellung von elektrischer Energie durch regenerative Energieträger; diese liefern Energie diskontinuierlich. Für eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie müssen daher Energiespeicher ausreichender Kapazität zur Verfügung stehen. Eine Möglichkeit dazu bieten im Gebirge

angelegte Pumpspeicherwerke. Einen anderen prinzipiellen Weg eröffnet die Wasserstofftechnik, also die elektrolytische Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff und die anschließende Speicherung des Wasserstoffes in entsprechend dimensionierten Behältern.

2. Die Energie des Magnetfeldes

Bei der Herleitung einer quantitativen Beziehung für die Energie des Feldes gingen wir im elektrischen Fall von einem eindrucksvollen Versuch aus, welcher die Existenz von Energie im elektrischen Feld demonstrierte. Bei dieser Betrachtung wurde die Gültigkeit des Energiesatzes vorausgesetzt, was auch bei den folgenden Betrachtungen der Fall ist. Prinzipiell wurde dabei die Vorstellung zu Grunde gelegt, dass das elektrische Feld Träger von Energie ist und dass durch geeignete Prozesse diese vorhandene Energie in andere - leicht wahrnehmbare - Formen von Energie umgewandelt werden kann. Das Feld wurde hier also als Energiequelle angesehen.

Bei der Herleitung eines quantitativen Ausdruckes für die Energie des Magnetfeldes wird in der folgenden Betrachtung ein anderer Weg gewählt, und zwar wird eine Analogie zwischen elektrischem und magnetischem Feld herangezogen. Ausgangspunkt der Überlegung ist die (nicht unbegründete) Vermutung, dass zum Aufbau eines Feldes - also hier des Magnetfeldes - Energie erforderlich ist. Beim Aufbau eines elektrischen Feldes durch Laden eines Kondensators ist dies leicht einzusehen: Auf jede Platte des Kondensators müssen Ladungsträger desselben Vorzeichens aufgebracht werden, und da in diesem Fall Coulomb'sche Abstoßungskräfte überwunden werden müssen, so ist zum Aufbringen der Ladungsträger Energie erforderlich. Ausgangspunkt für die experimentelle Untersuchung war also die begründete Annahme, dass im elektrischen Feld Energie vorhanden sein müsse, welche durch Umwandlungsprozesse frei gesetzt werden kann.

Beim Magnetfeld ist die Situation grundsätzlich ähnlich, aber teilweise etwas komplizierter. Will man ein Magnetfeld in einer Spule aufbauen, so muss ein Elektronenstrom durch die Spule fließen. Da im Idealfall bei einer Spule der Ohm'sche Widerstand als null angesehen wird und die Spule (bei unsere Betrachtung) an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen wird, so könnte man zunächst vermuten, dass der Aufbau des Magnetfeldes in der Spule „widerstandsfrei“ (also ohne Energiebedarf) erfolgt. Dies ist aber nicht so, denn durch den Einschaltvorgang wächst der Elektronenstrom in der Spule im Laufe der Zeit an. Dies hat zur Folge, dass in der Spule auf der Grundlage des Induktionsgesetzes eine elektrische Spannung induziert wird (die Induktionsspannung U_{ind}), welche - nach dem Lenz'schen Gesetz - das Anwachsen des Elektronenstromes zu behindern sucht. Zur Überwindung dieser Gegenspannung ist Energie erforderlich; diese muss von der von außen angelegten elektrischen Quelle geliefert werden und ist danach im Magnetfeld der Spule vorhanden. Dieser Gedanke steht also am Ende einer Überlegung und sollte durch das Experiment gestützt werden (im Unterschied zu der beim elektrischen Feld betriebenen Betrachtung, bei welcher die Existenz einer Energie dieses Feldes am Ausgangspunkt der Überlegungen stand).

Zum leichteren Verständnis der auf die Erarbeitung eines quantitativen Zusammenhanges für die Energie des Magnetfeldes gerichteten Vorgehensweise ist es daher zweckmäßig, einen Blick auf das Phänomen „Selbstinduktion bei einer Spule“ zu werfen.

2.1 Die Eigeninduktivität einer Spule - eine Folge des Induktionsgesetzes

Nach den vorausgegangenen Überlegungen entsteht in einer Spule beim Ein- und Ausschaltvorgang aufgrund der Änderung des magnetischen Flusses (welcher die Spule in Richtung ihrer Achse durchsetzt) nach dem Induktionsgesetz zwischen den Enden der Spule eine elektrische Spannung der Größe

$$U_{\text{ind}} = - n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

Benützt man die für die magnetische Feldstärke H in einer langen Spule gültige Beziehung und setzt diese ein, so ergibt sich:

$$U_{\text{ind}} = - \mu_r \mu_0 n^2 (A/l) (\Delta I / \Delta t) .$$

(n = Windungszahl der Spule

A = Querschnittsfläche der Spule

l = Länge der Spule

μ_0 = magnetische Feldkonstante

μ_r = Permeabilitätszahl

ΔI = Änderung des Elektronenstromes in der Spule

Δt = zeitliche Dauer, in welcher die Änderung des Elektronenstromes in der Spule erfolgt).

Führt man an dieser Stelle eine neue Größe ein, nämlich die so genannte Eigeninduktivität L einer Spule, und definiert diese folgendermaßen

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 (A/l) ,$$

so ergibt sich für die zwischen den Enden der Spule induzierte Spannung

$$U_{\text{ind}} = - L (\Delta I / \Delta t) .$$

Die Einheit der Eigeninduktivität wird zu Ehren des amerikanischen Physikers Joseph HENRY (1797 - 1878) nach diesem benannt. Es ist

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V s A}^{-1} .$$

Die Eigeninduktivität einer im Unterricht verwendeten Lehrmittelspule ($n = 500$) beträgt etwa $0,01 \text{ H}$ für Luft, mit Eisenkern etwa 10 H . Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wert der Permeabilitätszahl μ_r sehr stark vom Material und dessen

Bearbeitung abhängt; für Eisen kann näherungsweise $\mu_r = 1000$ angesetzt werden.

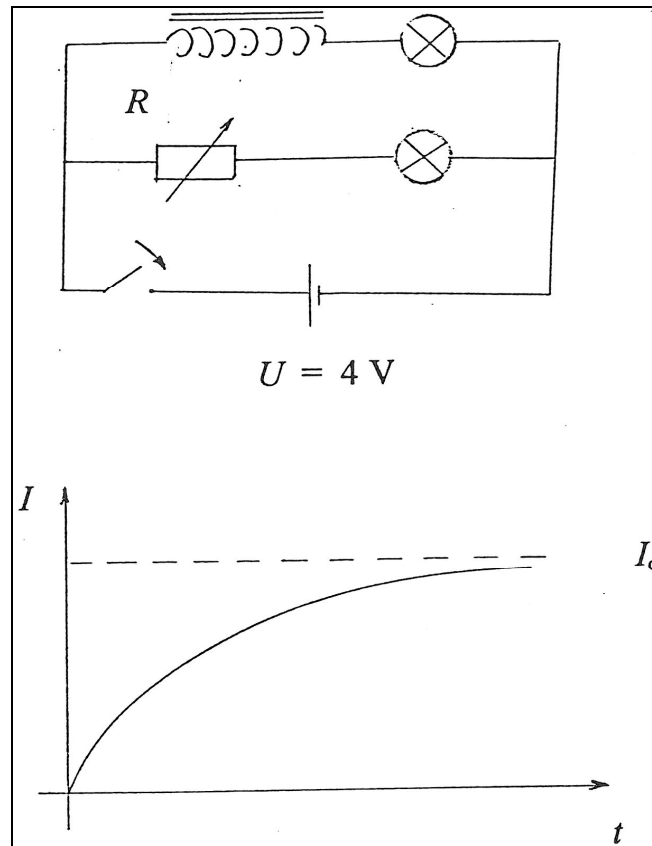


Abb. 5.2.1: Zum langsamen Anwachsen des Elektronenstromes nach Anlegen der äußeren Gleichspannung bei einer im Stromkreis liegenden Spule großer Eigeninduktivität. Der Anstieg der Stromstärke I ist an der langsamen Zunahme der Helligkeit des Lämpchens im Kreis der Spule zu erkennen, die quantitative Behandlung ergibt einen exponentiellen Anstieg des Elektronenstromes im Laufe der Zeit. Versuchsdaten: Glühlämpchen $3,5\text{ V} / 0,2\text{ A}$; variabler Widerstand $100\ \Omega$; Spule auf geschlossenem Kern $n = 500$.

Das langsame Anwachsen des Stromes in einer Spule nach Anlegen der äußeren Gleichspannung kann mit einer Spule hoher Eigeninduktivität und einem Glühlämpchen demonstriert werden. Nach dem Anlegen der Spannung erreicht das Lämpchen erst allmählich seine volle Helligkeit. Bedeutet U_0 die von außen angelegte Spannung, so ergibt sich:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_o + U_{\text{ind}}}{R}$$

$$I = (1/R) \cdot \{ U_o - L (dI / dt) \} .$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ergibt für den Einschaltvorgang:

$$I = I_o \cdot (1 - e^{-(R/L) t}) ,$$

also einen exponentiellen Anstieg der Stromstärke I bei sofort von außen wirkender Gleichspannung. Dabei ist I_o der asymptotische Grenzwert des Elektronenstromes, welcher - mathematisch gesehen - nach unendlich langer Zeit erreicht wird. Für praktische Belange kann davon ausgegangen werden, dass dieser Endwert nach einer Zeit erreicht wird, welche dem Zehnfachen von (L/R) entspricht (Die Größe L/R hat die Dimension einer Zeit; die Exponentialfunktion hat dann den festen Wert e^{-10}). Für den Ausschaltvorgang ergibt sich entsprechend ein langsames Abklingen der Stromstärke nach der Beziehung

$$I = I_o \cdot e^{-(R/L) t} .$$

Aus der obigen Differentialgleichung erhält man diesen Ausdruck, wenn die von außen angelegte Spannung U_o gleich null gesetzt wird. Weiter ist bei der Lösung die Anfangsbedingung zu berücksichtigen; sie lautet, dass zum Zeitpunkt des Ausschaltens (also für $t = 0$) die Stromstärke den Wert I_o einnimmt.

2.2 Herleitung einer Beziehung zur Beschreibung der Energie eines Magnetfeldes

In der nachfolgenden Betrachtung soll zunächst durch einen Demonstrationsversuch gezeigt werden, dass ein Magnetfeld als Träger von Energie betrachtet werden kann. Anschließend wird in einer quantitativen Darstellung die Energie des Magnetfeldes für den Sonderfall einer langen Spule bestimmt.

Demonstrationsversuch

Ziel dieses Demonstrationsversuches ist es, eine experimentelle Stütze für die Vermutung zu liefern, ein Magnetfeld könne Träger von Energie sein.

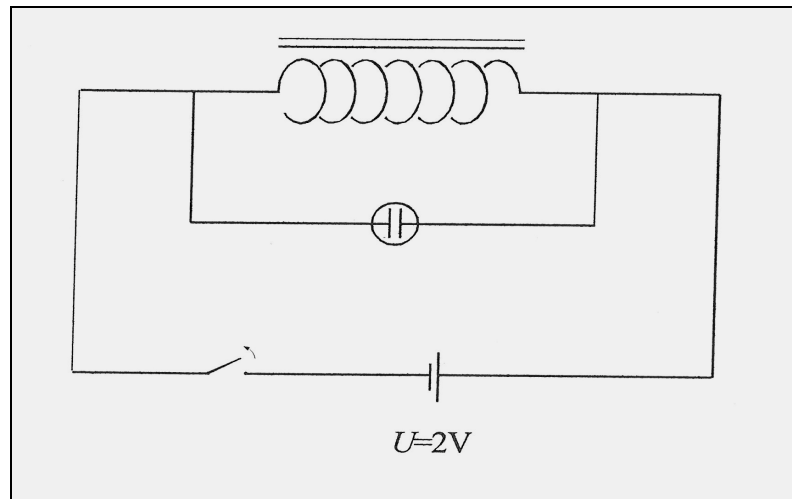


Abb. 5.2.2 Versuch zur Demonstration der in einem Magnetfeld gespeicherten Energie.

Parallel zu einer Spule mit geschlossenem Eisenkern ($n = 500$; $L = 10 \text{ H}$) liegt eine Glimmlampe (Zündspannung ca. 100 V) an einem Akku (2 V). Beim Abschalten der angelegten Gleichspannung zündet die Glimmlampe, da die entstehende Induktionsspannung größer als die Zündspannung ist. Dies stützt die Vermutung, dass die Energie für die Zündung der Glimmlampe aus dem zusammenbrechenden Magnetfeld der Spule stammt.

Bei dem Versuch ist eine Spule großer Eigeninduktivität an eine verhältnismäßig kleine Gleichspannung (2 V) angeschlossen. Parallel zu der Spule liegt eine Glimmlampe deren Zündspannung etwa 100 V beträgt. Nach Anlegen der Spannung wächst die Stromstärke in der Spule an, die Glimmlampe zündet nicht. Wird der Spulenstrom ausgeschaltet, so zündet (!) die Glimmlampe, was in Anbetracht der verwendeten kleinen Spannung zunächst überraschend ist. Erklärt werden kann die Erscheinung durch die schnelle Abnahme des Magnetfeldes beim Abschalten der Batterie und durch die dabei entstehende große Induktionsspannung, welche offensichtlich zum Zünden der Glimmlampe ausreicht. Energetisch gesehen

bedeutet dies, dass die für den Zündvorgang erforderliche Energie offensichtlich aus dem Magnetfeld der Spule stammt, wodurch die eingangs genannte Vermutung gestützt wird.

Quantitative Betrachtung

Den eben beschriebenen Demonstrationsversuch kann man heranziehen um die Energie des Magnetfeldes einer Spule zu bestimmen. Der grundlegende Gedanke ist dabei folgender: Man nimmt an, dass das Magnetfeld Träger von Energie ist und man setzt die Gültigkeit des Energiesatzes voraus. Eine direkte Bestimmung der Energie des Magnetfeldes aus magnetischen Größen ist nicht möglich; man greift deshalb auf eine Umwandlung der magnetischen Energie in eine Form der elektrischen Energie zurück. Dies kann dadurch geschehen, dass man in dem geschilderten Demonstrationsversuch die äußere elektrische Quelle abschaltet und die beiden Enden der Spule über die Glimmlampe elektrisch leitend verbindet. Die Folge ist die Entstehung der beschriebenen Induktionsspannung U_{ind} und ein sich daraus ergebender (zeitlich veränderlicher) Elektronenstrom I während der zeitlichen Dauer Δt . Diese - vom System der Spule aus gesehen - nach außen abgegebene magnetische Energie muss (nach dem Energiesatz) im Idealfall gleich der im Leiterkreis umgesetzten elektrischen Energie sein, und für diese gilt:

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = (\Delta W)_{\text{el}}$$

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = U_{\text{ind}} \cdot I \cdot (\Delta t) .$$

Setzt man für die induzierte Spannung den oben erhaltenen Ausdruck mit der Eigeninduktivität L ein, so ergibt sich:

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = - L \cdot (\Delta I / \Delta t) \cdot I \cdot (\Delta t)$$

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = - L \cdot I \cdot (\Delta I) .$$

Die vorliegende Betrachtung bezieht sich auf den Ausschaltvorgang. Bei der Lösung der Differentialgleichung müssen die Anfangsbedingungen beachtet werden. Im vorliegenden Fall sinkt der Elektronenstrom I während der zeitlichen Dauer Δt vom Maximalwert auf null. Unter Berücksichtigung dieser Bedingung ergibt sich durch Integration für die Energie des Magnetfeldes der Spule

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = (1/2) L I^2.$$

Setzt man in diese Gleichung den Wert für die Eigeninduktivität L ein und berücksichtigt das Volumen der Spule (Spulenquerschnittsfläche A , Spulenlänge l) mit

$$\Delta V = A l$$

und die magnetische Feldstärke der Spule

$$|\vec{H}| = (n / l) I ,$$

so folgt für die Energie

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = (1/2) \mu_r \mu_o (n^2 / l^2) A l I^2$$

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = (1/2) \mu_r \mu_o |\vec{H}|^2 (\Delta V)$$

und für die Energiedichte des Magnetfeldes:

$$(\Delta W)_{\text{mag}} / (\Delta V) = (1/2) \mu_r \mu_o |\vec{H}|^2.$$

Diese Beziehung ist analog der Gleichung für die Energiedichte des elektrischen Feldes, wenn dabei die beiden Feldgrößen \vec{E} und \vec{H} als einander entsprechend angesehen werden.

Anmerkung 1

An dieser Stelle soll noch ein vergleichender Blick auf die Energie von elektrischem und magnetischem Feld geworfen werden. Die Gleichungen für die Energiedichten der beiden Felder entsprechen einander, es sind jedoch auch Besonderheiten zu beachten. Nachfolgend wird ein Unterschied zwischen den

beiden Feldern beschrieben. Betrachtet man das elektrische Feld eines Kondensators, so bleibt dieses - im Idealfall einer vollständigen elektrischen Isolierung - für beliebig lange Zeit unverändert erhalten. Zur Erhaltung des vorliegenden Energiezustandes ist also keine weitere Maßnahme erforderlich. Etwas anders ist dagegen die Lage beim Magnetfeld. Zur Beschreibung der Energie des Magnetfeldes einer Spule wählt man ein Bezugssystem, in welchem sich die Träger elektrischer Ladungen bewegen (beschrieben wird dies durch die betreffende Stromstärke I). Eine Folge des konstanten Strömens der Ladungsträger ist – in diesem Bezugssystem - ein ortsfestes, zeitlich konstantes Magnetfeld mit der hier beschriebenen Energiedichte. Zur Aufrechterhaltung dieses Energiezustandes ist das Strömen der Träger elektrischer Ladungen eine unerlässliche Bedingung. Dies bedeutet, dass im vorliegenden Fall ständig ein Ladungsträgerstrom der Stärke I durch die Spule fließen muss. Im Idealfall ist der Ohm'sche Widerstand der Spule gleich null; dies würde bedeuten, dass der Zustand der konstanten Stromstärke I ohne Energiezufuhr von außen möglich ist. In der Realität ist dies höchstens näherungsweise gegeben, so dass hier zur Erhaltung des beschriebenen Energiezustandes ständig Energie durch die angeschlossene elektrische Quelle zugeführt werden muss.

Ein weiterer Punkt betrifft den folgenden Vorgang. Wir gehen davon aus, dass ein Ladungsträgerstrom durch die Spule fließt und folglich ein Magnetfeld mit der entsprechenden Energie existiert. Jetzt soll der Ladungsträgerstrom abgeschaltet werden. Damit stellt sich die Frage, was - auf der Grundlage des Energiesatzes - mit der Energie des Magnetfeldes geschieht. Nach den bisherigen Überlegungen wird der Ladungsträgerstrom abnehmen, und zwar von einem Maximalwert gegen null. Das Magnetfeld der Spule wird folglich immer kleiner, es ändert sich im Laufe der Zeit. Um den weiteren Prozess zu erfassen, muss man auf die Maxwell'schen Gleichungen zurückgreifen. Diese besagen, dass ein sich im Laufe der Zeit änderndes Magnetfeld

von einem sich zeitlich ändernden elektrischen Feld begleitet ist, und dass dieses wiederum von einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld umgeben ist. Es entsteht also eine elektromagnetische Welle, welche sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Dieser Vorgang ist mit dem Strömen von Energie verbunden, und dies bedeutet, dass nach dem Abschalten des Ladungsträgerstromes die Energie des Magnetfeldes in Strahlungsenergie umgewandelt wurde.

Ein Punkt, der noch angesprochen werden soll, betrifft die Energie des Magnetfeldes einer Spule, wenn sich im Inneren der Spule ein Eisenkern ($\mu_r = 1000$) befindet. Nach der hergeleiteten Beziehung ist dann die Energie dieses Magnetfeldes 1000 – mal so groß wie in dem Fall, da sich die Spule im Vakuum (bzw. mit guter Näherung in Luft) befindet. In beiden Fällen wird dieselbe elektrische Quelle von außen angeschlossen, und in beiden Fällen erreicht die Stromstärke I in der Spule denselben Endwert. Es stellt sich die Frage, wie die sehr unterschiedlichen Energiewerte der beiden Magnetfelder (in der Luftspule und der Spule mit ferromagnetischem Kern) entstehen. Betrachtet man die zum Aufbau dieser Energie notwendige elektrische Energie, welche nach dem Energiesatz gleich der Energie des aufgebauten Magnetfeldes sein muss, so gilt

$$(\Delta W)_{\text{mag}} = U \cdot I \cdot (\Delta t).$$

Die angelegte Spannung U und der Endwert I_0 der Stromstärke sind in beiden Fällen gleich; ein unmittelbar zu beobachtender Unterschied liegt in der Zeitdauer (Δt) , welche benötigt wird um den Endwert der Stromstärke zu erreichen. Im Fall der Spule mit ferromagnetischem Kern ist diese zeitliche Dauer sehr viel größer als im Fall der Luftspule. Die Ursache liegt in der großen Eigeninduktivität der Spule mit Eisenkern, welche - bedingt durch die große induzierte Gegenspannung - ein äußerst langsames Anwachsen der Stromstärke I bewirkt. Beim

Einschaltvorgang wird also bei der Spule mit dem ferromagnetischem Kern ein Vielfaches der Energie im Vergleich zur Luftspule zugeführt; der Faktor ist gleich der Permeabilitätszahl μ_r .

Damit stellt sich eine wichtige Frage, die bei Energieumsetzungen auftritt; sie lautet: Welche Prozesse finden bei dieser Energiezufuhr in einer Spule mit Eisenkern statt, und zu welchem Ergebnis führen diese Vorgänge? Eine Antwort findet man, wenn man den Blick auf die mikroskopische Struktur eines Körpers aus ferromagnetischem Material wirft. Der ferromagnetische Kern ist zunächst nicht magnetisch; in seinem Inneren existieren mikroskopische Bereiche mit eingelagerten „Elementarmagneten“, die räumlich gleichmäßig verteilt sind (und folglich erscheint der Kern nach außen hin unmagnetisch). Wenn man den Kern aber in ein äußeres Magnetfeld hineinbringt, so werden diese mikroskopischen Bereiche durch die Einwirkung des äußeren Magnetfeldes (mehr oder weniger stark) in Richtung des Feldes ausgerichtet, und dazu wird die in diesem Fall aufgewandte Energie verwendet. Eine Folge davon ist eine erhebliche Verstärkung des Magnetfeldes, und zwar ist die magnetische Flussdichte bei einer Spule mit Eisenkern μ_r -mal so groß wie die Flussdichte bei einer Luftspule (gleiche sonstige Bedingungen vorausgesetzt). Die unterschiedlich großen Energien von Spulen mit und ohne Eisenkern sind also in ihren höchst unterschiedlich starken Magnetfeldern gespeichert.

Anmerkung 2

Die in einem Magnetfeld speicherbare Energie ist - genauso wie beim elektrischen Feld - sehr klein. Bei einer Spule mit geschlossenem Eisenkern und einer Eigeninduktivität von 10 H ergibt sich bei einem Spulenstrom von 10 A eine Energie von 500 J, ohne Eisenkern sogar nur von 0,5 J.

VI. Die Abhängigkeit der Feldbeschreibung vom Bezugssystem

In einem vorausgegangenen Kapitel wurde ein Phänomen dargestellt, welches unter dem Namen „Lorentz-Kraft“ in der Literatur behandelt wird. Dabei geht es um den nachfolgend nochmals kurz beschriebenen Sachverhalt. Gegeben ist ein räumlich und zeitlich konstantes Magnetfeld, das durch eine stromdurchflossene lange Spule realisiert werden kann. Dann bewege sich ein elektrisch geladenes Teilchen mit der Geschwindigkeit \vec{v} quer zu den Feldlinien dieses Magnetfeldes. Als Folge dieser Bewegung tritt eine Kraft \vec{F}_L auf, die offensichtlich von dem Magnetfeld auf das bewegte geladene Teilchen ausgeübt wird und die der Gleichung

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

genügt. Dabei bedeuten q die elektrische Ladung des Teilchens (einschließlich des Vorzeichens der Ladung) und \vec{B} die magnetische Flussdichte des Magnetfeldes.

Für die Gültigkeit dieser Gleichung ist eine Besonderheit zu beachten: Es ist ein Bezugssystem zu wählen, in welchem das Magnetfeld ruht. Die Geschwindigkeit \vec{v} des Teilchens ist dann relativ zu diesem Bezugssystem zu messen, ebenso die aus der gegebenen physikalischen Konstellation resultierende Kraft \vec{F}_L .

Dieser experimentell gesicherte Tatbestand ist erstaunlich, denn man beobachtet die Einwirkung eines magnetischen Feldes auf ein elektrisch geladenes Teilchen, was ungewöhnlich ist. Üblicherweise wirken elektrische Felder auf elektrisch geladene Teilchen und Magnetfelder auf Magnete. Dies gibt Anlass zu der Vermutung, dass die Beschreibung magnetischer und elektrischer Felder von der Wahl des Bezugssystems beeinflusst werden könnte.

1. Die Abhängigkeit der Beschreibung des elektrischen Feldes vom Bezugssystem

Die Überschrift dieses Abschnittes deutet an, dass die Beschreibung von Phänomenen, welche auf die Existenz eines elektrischen Feldes zurück zu führen sind, möglicherweise von der Wahl des Bezugssystems abhängt. Ein Beispiel dafür ist die Lorentz – Kraft. In diesem Fall bewegt sich ein elektrisch geladenes Teilchen quer zu den Feldlinien eines (im Bezugssystem) ruhenden Magnetfeldes. Auf das – elektrisch geladene (!) - bewegte Teilchen wirkt eine Kraft, obwohl nur das Magnetfeld und **kein elektrisches Feld** für die Entstehung dieser Kraft erkennbar ist. Es liegt also ein erklärungsbedürftiger Tatbestand vor. Bevor darauf näher eingegangen wird, soll kurz in Erinnerung gebracht werden, wie nach bisherigen Vorstellungen ein elektrisches Feld hergestellt werden kann. Es gibt dazu zwei Methoden.

Verfahrensweise 1:

Ein elektrisches Feld kann durch ruhende Träger elektrischer Ladungen hergestellt werden. Die Beschreibung des Feldes geschieht durch Feldlinien, welche definitionsgemäß von den positiven zu den negativen Ladungsträgern verlaufen. Damit wird den Feldlinien eines elektrostatischen Feldes ein Anfangs- und ein Endpunkt zugeordnet. Ein Beispiel ist das elektrische Feld zwischen den Platten eines geladenen Kondensators.

Verfahrensweise 2:

Nach Maxwell entsteht ein elektrisches Feld, wenn sich ein Magnetfeld im Laufe der Zeit ändert. Das auf diese Weise erzeugte elektrische Feld kann durch ringförmig geschlossene Feldlinien beschrieben werden, ein Anfangs- oder Endpunkt der Feldlinien existiert in diesem Fall nicht. Realisiert werden kann dieses

Phänomen auf der Grundlage des elektromagnetischen Induktionsgesetzes (Zweite Maxwell'sche Gleichung, 1862): Ändert sich im Inneren einer Spule ein - längs der Spulenachse von außen einwirkendes - Magnetfeld, so tritt zwischen den Enden der Spule eine elektrische Spannung auf. Dies ist ein Indiz für die Existenz eines elektrischen Feldes, unter dessen Einfluss im Leiter die beweglichen Ladungsträger getrennt werden, was zur Entstehung der elektrischen Spannung führt.

An dieser Stelle kann man versuchen, die Entstehung der Lorentz – Kraft zu deuten, und zwar mit Hilfe eines elektrischen Feldes und des Begriffes der elektrischen Feldstärke \vec{E} . Diese Größe kann definitionsgemäß gemessen werden durch die Kraft auf eine im elektrischen Feld befindliche Ladung q :

$$\vec{F}_{\text{el}} = q \cdot \vec{E} .$$

Für die Lorentz-Kraft gilt nach den obigen Überlegungen:

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) .$$

Vergleicht man die Terme für die beiden Kräfte, so kann der Sachverhalt so gedeutet werden, als würde auf das bewegte elektrisch geladene Teilchen (häufig ein Elektron) ein elektrisches Feld der Stärke

$$\vec{E} = (\vec{v} \times \vec{B})$$

wirken. Diese Interpretation der Entstehung der Lorentz – Kraft zeigt, dass es noch eine weitere Möglichkeit gibt, um ein elektrisches Feld herzustellen - zusätzlich zu den beiden eingangs genannten Verfahrensweisen. Die weit darüber hinaus gehende Bedeutung der obigen Beziehung liegt aber in der Erkenntnis, dass die Existenz eines elektrischen Feldes vom gewählten Bezugssystem abhängt.

Diese dritte Möglichkeit zur Herstellung eines elektrischen Feldes kann wie folgt beschrieben werden:

Verfahrensweise 3:

Es wird von einem Bezugssystem ausgegangen, in welchem ein Magnetfeld ruht und in dem sich ein geeigneter Indikator (hier zum Nachweis eines elektrischen Feldes) relativ zu dem Magnetfeld bewegt. Aus dieser physikalischen Konstellation ergibt sich dann das nachfolgend beschriebene Phänomen.

Bewegt sich ein Indikator (beispielsweise ein elektrisch geladenes Teilchen oder ein Messgerät zur Feststellung eines elektrischen Feldes) mit der Geschwindigkeit \vec{v} relativ zu einem im Bezugssystem ruhenden Magnetfeld der Flussdichte \vec{B} , so registriert dieser Indikator ein elektrisches Feld der Stärke

$$\vec{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) .$$

Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass der erwähnte Indikator dann ein elektrisches Feld registriert, wenn er sich quer zu den Feldlinien des Magnetfeldes bewegt. Besteht der Sonderfall, dass die Geschwindigkeit \vec{v} des Indikators parallel zur Flussdichte \vec{B} gerichtet ist, so wird keine elektrische Feldstärke wahrgenommen. Diese besondere Situation wird aus obiger Gleichung ersichtlich, da in diesem Fall das Vektorprodukt aus Geschwindigkeit und Flussdichte gleich null wird.

Hinweis

In der bisherigen Darstellung wurde betont, dass bei der quantitativen Beschreibung der Lorentz-Kraft und der daran anschließenden Folgerung der Existenz eines elektrischen Feldes das Bezugssystem so zu wählen ist, dass in diesem Bezugssystem das Magnetfeld ruht. Diese Darstellung bedarf einer Erweiterung, denn der wesentliche Punkt des Sachverhaltes ist folgender: Nach der hier genannten Verfahrensweise drei ist für die Existenz eines

elektrischen Feldes entscheidend eine Relativbewegung zwischen dem Magnetfeld und dem Indikator sowie ein Bezugssystem, in welchem entweder das Magnetfeld oder der Indikator für das elektrische Feld ruht. Bei der bisherigen Beschreibung ruht das Magnetfeld im gewählten Bezugssystem und der Indikator (hier das elektrisch geladene Teilchen) bewegt sich. Es ist aber auch eine andere Betrachtungsweise zulässig. Man kann ein Bezugssystem wählen in welchem das elektrisch geladene Teilchen ruht und in welchem sich das Magnetfeld relativ zu diesem Teilchen bewegt. Auch in diesem Fall registriert der neben dem Teilchen befindliche Beobachter (der in diesem Bezugssystem ebenfalls ruht) ein elektrisches Feld. Vergleicht man die beiden Konstellationen - ruhendes Magnetfeld und bewegter Ladungsträger auf der einen Seite und bewegtes Magnetfeld und ruhender Ladungsträger auf der anderen Seite - so ergibt sich für die registrierte elektrische Feldstärke \vec{E} ein übereinstimmendes Ergebnis. Im Falle des bewegten Ladungsträgers gilt die oben genannte Beziehung, im Falle des bewegten Magnetfeldes folgt für \vec{E} :

$$\vec{E} = (\vec{B} \times \vec{u}) .$$

Die Relativgeschwindigkeit \vec{u} des bewegten Magnetfeldes hängt mit der im erstgenannten Fall gewählten Relativgeschwindigkeit \vec{v} des Ladungsträgers zusammen gemäß der Beziehung

$$\vec{u} = - \vec{v} .$$

Die Flussdichte \vec{B} des Magnetfeldes hat in beiden Fällen den gleichen Wert.

Eine experimentelle Bestätigung dieses Sachverhaltes ergibt sich aus der Funktionsweise von Elektromotoren unterschiedlicher Bauart. Es gibt Motoren, bei denen das Magnetfeld ruht und sich die Ladungsträger im „Läufer“ relativ dazu bewegen; und es gibt andererseits Motoren, bei denen die im Leiter befindlichen Ladungsträger ruhen und das Magnetfeld sich relativ dazu bewegt. In beiden Fällen entsteht ein elektrisches Feld der beschriebenen Größe.

2. Die Abhängigkeit der Beschreibung des magnetischen Feldes vom Bezugssystem

Im vorausgegangenen Abschnitt wurde aufgezeigt, dass die Beschreibung eines elektrischen Feldes durch die Wahl des Bezugssystems beeinflusst werden kann. Da elektrische und magnetische Felder in vielen Punkten Parallelen aufweisen, so liegt die Frage nahe, ob nicht auch die Beschreibung magnetischer Felder vom gewählten Bezugssystem abhängen könnte. Das Auffinden einer Antwort auf diese Frage wird durch einen Versuch von Henry Augustus ROWLAND (1848 – 1901) gewiesen, den dieser im Jahre 1876 durchführte. Zuvor soll wiederholt werden, wie Magnetfelder nach den bisher genannten Methoden hergestellt werden können.

Verfahrensweise 1

Ein Magnetfeld besteht zwischen den Polen eines Dauermagneten. Das Feld kann durch Feldlinien charakterisiert werden, welche - definitionsgemäß - vom Nordpol des Magneten zu dessen Südpol weisen.

Diese - auf den ersten Blick statische - Möglichkeit zur Erzeugung eines Magnetfeldes kann man sich modellmäßig durch „Elementarmagnete“ entstanden denken, welche im molekularen Bereich auftreten. Nach André-Marie AMPÈRE (1775 – 1836) ist die Existenz dieser Elementarmagnete jedoch durch die Bewegung von Trägern elektrischer Ladungen zu deuten (1823). Ampère führt damit die Existenz von Permanentmagneten auf das von Oersted entdeckte Phänomen strömender Träger elektrischer Ladungen (und damit auf die hier erwähnte Verfahrensweise 2) zurück.

Verfahrensweise 2

Magnetfelder können durch bewegte Träger elektrischer Ladungen hergestellt werden. Bei dem Versuch nach Oersted strömen Träger elektrischer Ladungen in einem

Leiter, welcher im Bezugssystem des Beobachters ruht. Dabei werden die Ladungsträger durch eine von außen angelegte elektrische Spannung in Bewegung gehalten. Als Folge dieses Strömens elektrischer Ladungsträger tritt ein Magnetfeld auf, welches im Bezugssystem des Beobachters ruht (also auch bezüglich des Leiters ruht!).

Verfahrensweise 3

Nach MAXWELL entsteht ein Magnetfeld, wenn sich ein elektrisches Feld im Laufe der Zeit ändert (Erste Maxwell'sche Gleichung, 1862). Ein auf diese Weise erzeugtes Magnetfeld kann durch ringförmig geschlossene Feldlinien beschrieben werden, ein Anfangs- oder Endpunkt dieser Feldlinien existiert nicht. Realisiert werden kann dieses Phänomen auf der Grundlage der genannten Maxwell'schen Gleichung („Durchflutungsgesetz“). Ein Beispiel ist die Entladung eines Plattenkondensators. Vor der Entladung besteht zwischen den Platten ein homogenes elektrisches Feld, während der Entladung wird dieses elektrische Feld kleiner und es ist dabei von ringförmig geschlossenen magnetischen Feldlinien umgeben.

An dieser Stelle wenden wir uns wieder dem eingangs erwähnten Versuch von Rowland zu; er benutzte einen an einer Stelle unterbrochenen Metallring (Durchmesser ≈ 20 cm), der elektrisch positiv geladen war. Der Ring befand sich in einem geerdeten Metallgehäuse und wurde dann um eine senkrechte Achse in Rotation versetzt (Frequenz ≈ 50 Hz). Außerhalb des Metallgehäuses war ein empfindliches Magnetoskop angebracht, welches während der Rotation des Ringes ein Magnetfeld anzeigt. Somit liegt folgendes Versuchsergebnis vor: Auch mechanisch bewegte Träger elektrischer Ladungen erzeugen ein Magnetfeld, und nicht nur - wie im Versuch nach Oersted - Ladungsträger, die infolge einer von außen anliegenden elektrischen Spannung im Leiter strömen.

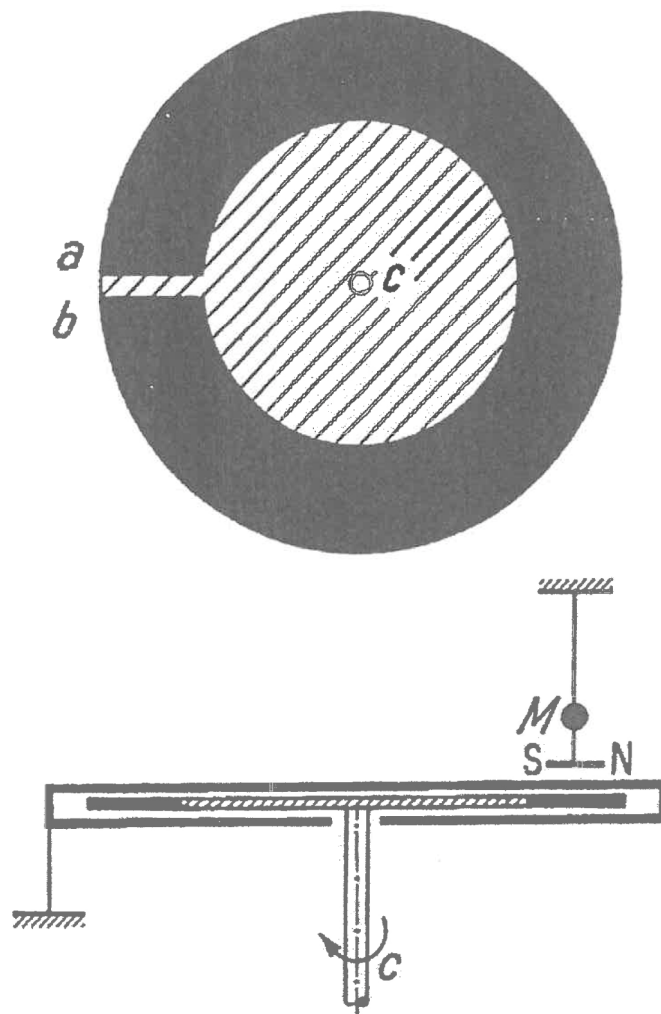


Abb. 6.2.1: Rowland'scher Versuch von 1876 (nach R.W. Pohl). Der rotierende Ring ist Träger elektrischer Ladungen und erzeugt während der Rotation ein Magnetfeld. Damit ist experimentell gezeigt, dass durch eine rein mechanische Bewegung von Trägern elektrischer Ladungen ein Magnetfeld hergestellt werden kann.

Für die Klärung der eingangs gestellten Frage - ob die Existenz eines Magnetfeldes durch die Wahl des Bezugssystems beeinflusst werden kann - ist eine Erweiterung des Versuches nach Rowland entscheidend. Dazu kann der eben beschriebene Versuch in folgender Weise abgewandelt werden: Statt des rotierenden Ringes und des den Ring umschließenden Gehäuses wählt man zwei in kleinem Abstand übereinander liegende gleiche geschlossene Metallringe, die um eine gemeinsame vertikale

Achse rotieren können. An die beiden Ringe legt man eine elektrische Spannung, so dass die Apparatur als geladener Kondensator wirkt. Zwischen den Ringen besteht somit ein elektrisches Feld, und in dieses Feld hinein bringt man ein Magnetoskop. Werden die Ringe jetzt in Rotation versetzt, so zeigt das Magnetoskop einen Ausschlag an, es existiert also ein Magnetfeld.

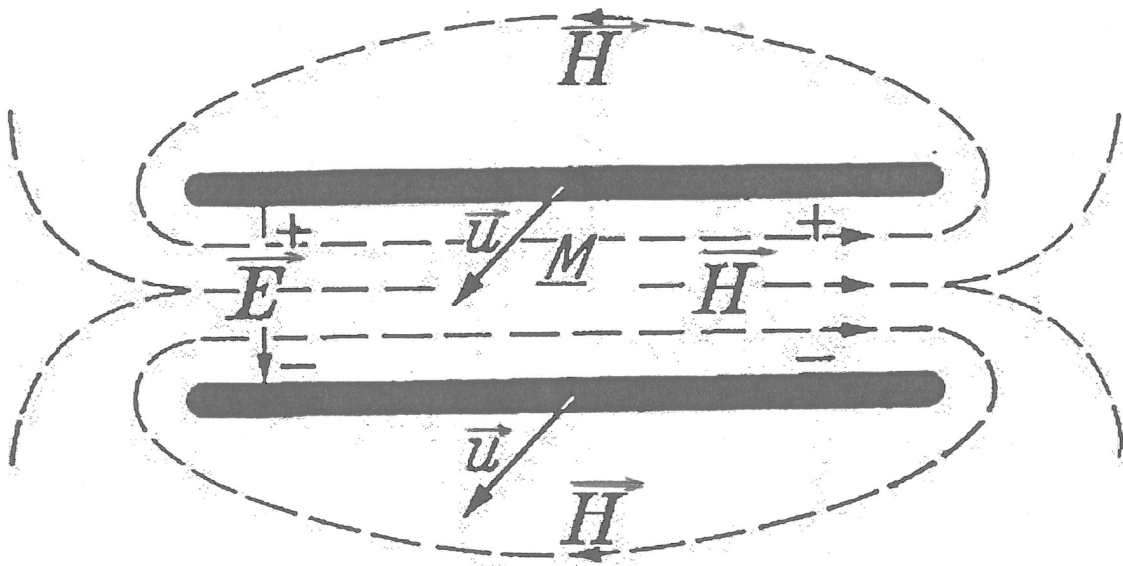


Abb. 6.2.2: Erzeugung eines Magnetfeldes durch ein bewegtes elektrisches Feld (nach R.W. Pohl). In dem Bild bewegen sich die Platten eines geladenen Kondensators mit der Geschwindigkeit \vec{u} senkrecht zur Zeichenebene auf den Betrachter zu. Als Folge dieser Relativbewegung zwischen dem im Bezugssystem ruhenden Magnetoskopes M und dem bewegten elektrischen Feld entsteht ein Magnetfeld der magnetischen Feldstärke \vec{H} .

Um dieses Phänomen in allgemeiner Weise zu deuten wählt man einen Beobachter, welcher sich neben dem Magnetoskop befindet. Dieser Beobachter kommt zu der Schlussfolgerung, dass zusätzlich zu dem vorhandenen elektrischen Feld (zwischen den Platten des geladenen Kondensators) noch ein Magnetfeld existiert, wenn zwischen dem Beobachter und dem elektrischen

Feld eine Relativbewegung besteht. Diese Aussage geht über die direkte experimentelle Erfahrung hinaus, denn in dem erweiterten Versuch nach Rowland ruht der Beobachter neben dem Magnetoskop (Indikator), das elektrische Feld bewegt sich bezüglich des Beobachters. Weiter führende Betrachtungen bestätigen diese Sichtweise, welche eine zusätzliche Methode zur Herstellung eines Magnetfeldes liefert.

Verfahrensweise 4

Bewegt sich ein Beobachter mit der Geschwindigkeit \vec{v} quer zu einem elektrischen Feld der Verschiebungsdichte \vec{D} , so registriert er zusätzlich zu dem bestehenden elektrischen Feld ein Magnetfeld der magnetischen Feldstärke

$$\vec{H} = (\vec{D} \times \vec{v}).$$

In diesem gewählten Bezugssystem ruht das elektrische Feld, der Beobachter bewegt sich in diesem System mit der Geschwindigkeit \vec{v} .

Hinweis

Am Schluss des vorangegangenen Abschnittes wurde darauf hingewiesen, dass für die dort beschriebene Art der Herstellung eines elektrischen Feldes ein Tatbestand entscheidend ist, nämlich die Relativbewegung zwischen dem Feld und dem Beobachter (welcher sein Nachweisgerät neben sich hat). Eine entsprechende Situation liegt auch bei der hier vorgestellten Verfahrensweise zur Herstellung eines Magnetfeldes vor. In Analogie zu der bei der Besprechung der Lorentz-Kraft aufgezeigten Sachlage wird dabei häufig das elektrische Feld als ruhend und der Beobachter als dazu relativ bewegt angesehen (mit der Geschwindigkeit \vec{v}). Das quantitative Ergebnis wird dann durch die obige Gleichung beschrieben.

Wird andererseits - wie in dem erweiterten Versuch nach Rowland - der Beobachter mit dem neben ihm befindlichen Magnetoskop als ruhend betrachtet, so bewegt sich in dem

gewählten Bezugssystem das elektrische Feld mit der Geschwindigkeit

$$\vec{u} = -\vec{v}$$

relativ zum Beobachter und seinem Messinstrument, und die mathematische Beschreibung ist entsprechend abzuändern. Es gilt in diesem Fall für die magnetische Feldstärke

$$\vec{H} = (\vec{u} \times \vec{D}).$$

wobei \vec{D} die elektrische Verschiebungsdichte bedeutet, die im Ruhesystem des Kondensators gemessen wird und in beiden Betrachtungsweisen den gleichen Wert besitzt.

3. Ein Problem der Feldbeschreibung, der Lösungsvorschlag und seine Folgen

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurde für die Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder ein Begriffssystem vorgestellt, welches die beobachteten Erscheinungen zutreffend beschreibt und welches als in sich konsistent angesehen werden kann. Dieses Ergebnis ist recht erfreulich; es gibt jedoch ein Phänomen, welches dieses harmonische Bild trübt. Die diesbezüglichen Betrachtungen wurden von Albert EINSTEIN (1878 – 1956) als eine gewisse „Unsymmetrie“ bei der Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder bezeichnet und führten letztlich in seiner im Jahre 1905 veröffentlichten Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ zur Formulierung der speziellen Relativitätstheorie. Nachfolgend wird das dazugehörige Gedankenexperiment beschrieben. Bei diesen Überlegungen wird von einer physikalischen Konstellation ausgegangen, die von zwei relativ zueinander (mit konstanter Geschwindigkeit) bewegten Beobachtern untersucht wird, wobei beide Beobachter zu unterschiedlichen Ergebnissen gelangen.

Deutungsweise 1

Gegeben ist ein Bezugssystem und in diesem ein gerader Leiter auf welchem sich Ladungsträger der Ladung $+Q$ befinden; der Leiter bewege sich in dem gewählten Bezugssystem mit der konstanten Geschwindigkeit \vec{v} parallel zu seiner Achse. Weiter befinde sich im Abstand \vec{r} von dem Leiter ein punktförmiges Gebilde (konkret: eine kleine Kugel) mit der Ladung $+q$. Dieser Ladungsträger soll sich ebenfalls mit der Geschwindigkeit \vec{v} parallel zur Achse des Drahtes bewegen. Diese Setzung ist keine Einschränkung der Allgemeinheit, sie soll lediglich die Betrachtung erleichtern. Wesentlich ist im vorliegenden Fall die einheitliche Relativbewegung aller Ladungsträger bezüglich des im gewählten Bezugssystem ruhenden Beobachters. Für diesen Beobachter ergibt sich folgende Sichtweise.

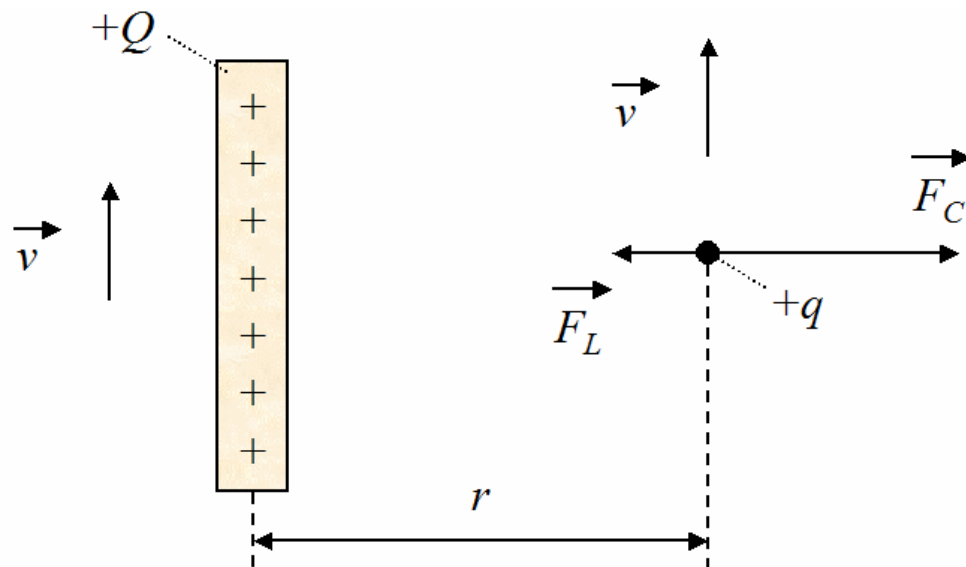


Abb. 6.3.1: Gegeben ist ein im Bezugssystem ruhender Beobachter sowie ein positiv geladener gerader Draht (Ladung $+Q$) und ein (nahezu) punktförmiger Träger der positiven Ladung $+q$ außerhalb dieses Drahtes; beide Ladungsträger sollen sich mit konstanter Geschwindigkeit parallel zur Achse des Drahtes bewegen. Als Folge dieser Konstellation registriert der Beobachter zwei Kräfte zwischen dem geladenen Draht und dem außerhalb davon befindlichen punktförmigen Träger der positiven Ladung $+q$: Eine Coulomb-Kraft und die Lorentz-Kraft.

Ergebnis 1

Für den Beobachter bewegen sich die Ladungsträger im Draht mit konstanter Geschwindigkeit, die Folge ist – nach Oersted – ein im Bezugssystem ruhendes (und zeitlich konstantes) Magnetfeld. Der außerhalb des Leiters befindliche Ladungsträger bewegt sich quer zu den Feldlinien dieses Magnetfeldes, folglich wirkt auf diesen Ladungsträger ein **elektrisches Feld**, und dieses wieder führt zur Entstehung der Lorentz – Kraft (welche bei den gewählten Voraussetzungen zum Draht hin gerichtet ist).

Ferner registriert der Beobachter eine Coulomb – Kraft, die zwischen den Ladungsträgern im Draht und dem außerhalb des Leiters befindlichen geladenen Teilchen wirkt (und die im vorliegenden gewählten Beispiel eine Abstoßung bewirkt).

Der Beobachter registriert also **zwei Kräfte** zwischen den Ladungsträgern im Draht und dem außerhalb des Leiters befindlichen Teilchen.

Deutungsweise 2

Die physikalische Konstellation ist grundsätzlich gleich wie bei der Betrachtungsweise 1: In dem geraden Draht befinden sich positive Ladungsträger der Ladung $+Q$, außerhalb des Leiters in einem festen Abstand ein einziges Teilchen der Ladung $+q$. Während jedoch bei der Betrachtungsweise 1 der Beobachter ruhte und sich die Ladungsträger mit einer einheitlichen Geschwindigkeit bewegten, so sollen jetzt – bei der Betrachtungsweise 2 – im gewählten Bezugssystem die Ladungsträger ruhen und der Beobachter soll sich parallel zur Achse des Leiters mit der konstanten Geschwindigkeit $-\vec{v}$ bewegen. Für diesen Beobachter ergibt sich die folgende Sichtweise.

Ergebnis 2

Es besteht zwischen den Ladungsträger im Draht und dem geladenen Teilchen außerhalb des Leiters lediglich eine (im gewählten Beispiel abstoßende) Coulomb – Kraft. Eine Lorentz – Kraft ist nicht feststellbar, da alle Ladungsträger im gewählten Bezugssystem ruhen und somit um den Draht herum

kein Magnetfeld existiert, welches die Lorentz – Kraft hervorrufen könnte.

Der Beobachter registriert also **eine einzige Kraft** zwischen den Ladungsträgern im Draht und dem außerhalb des Leiters befindlichen elektrisch geladenen Teilchen.

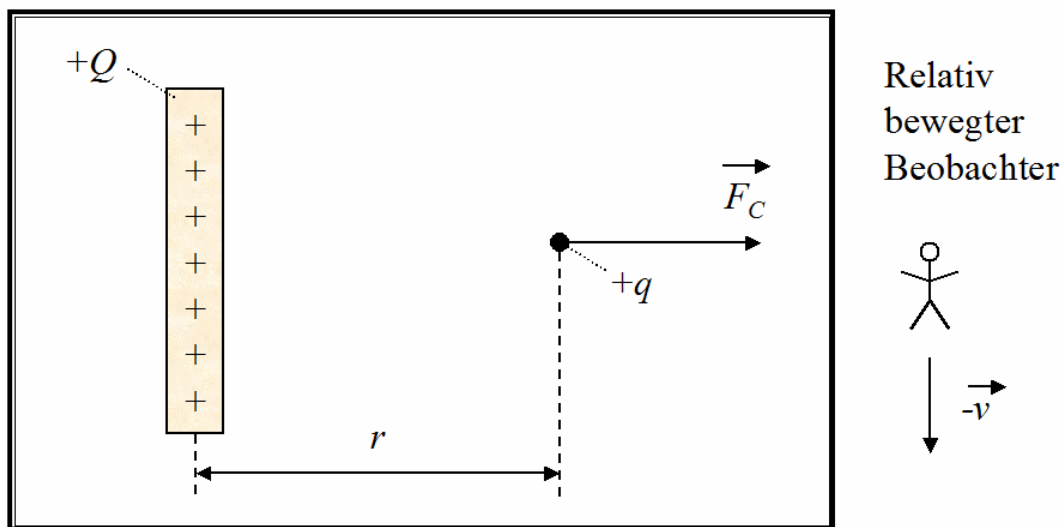


Abb. 6.3.2: Gegeben ist grundsätzlich die in Abbildung 6.3.1 beschriebene Konstellation. Anders als dort sollen aber jetzt die Ladungsträger im Draht und der außerhalb davon befindliche Ladungsträger im Bezugssystem ruhen. Der Beobachter bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit parallel zur Achse des Drahtes. Dieser Beobachter registriert nur **eine einzige Kraft**, nämlich die Coulomb - Kraft zwischen den Ladungsträgern im Draht und dem außerhalb davon befindlichen punktförmigen Träger der Ladung $+q$; eine Lorentz-Kraft existiert für diesen Beobachter nicht.

Will man die Ergebnisse der beiden Betrachtungsweisen 1 und 2 miteinander vergleichen, so sind bestimmte Voraussetzungen zu beachten. Eine Bedingung dafür ist die folgende: Man muss annehmen, dass das elektrische Feld in der Umgebung eines elektrisch geladenen Teilchens gleich ist, und zwar unabhängig davon, ob das Teilchen ruht oder ob es sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Weiter wird vorausgesetzt, dass bei

einem Vergleich der beiden Betrachtungsweisen das Prinzip einer Galilei – Transformation gilt. Man geht also von zwei Inertialsystemen aus, und dies bedeutet folgendes: Auf der Grundlage der klassischen Physik haben in beiden Bezugssystemen die gleichen physikalischen Gesetze Gültigkeit, und folglich müssen die Ergebnisse in beiden Fällen übereinstimmen.

Damit kommen wir zu einer Bewertung der vorausgegangenen Überlegungen. Beide Betrachtungsweisen führen zu widersprechenden Ergebnissen, und dieser Widerspruch kann im Rahmen der klassischen Physik nicht behoben werden. Einen Ausweg aus dieser misslichen Lage weisen die von Hendrik Antoon LORENTZ (1853 – 1928) im Jahr 1899 aufgestellten „Lorentz-Transformations-Gleichungen“. Ein wesentlicher Inhalt dieser Gleichungen besteht darin, dass beim Übergang zwischen den genannten Bezugssystemen nicht nur die Ortskoordinaten transformiert werden müssen, sondern auch die Zeit. Es lässt sich zeigen, dass der dargestellte Widerspruch beseitigt wird, wenn diese Transformationsgleichungen auf das beschriebene Problem angewendet werden. Der Preis für die Lösung des Problems ist hoch: Man verlässt den Boden der klassischen Physik, insbesondere die seit Isaac NEWTON (1643 – 1727) gehegte Vorstellung eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit. Mit diesem Begriffsgebäude der klassischen Mechanik ist die Elektrodynamik nicht vereinbar; dieses Teilgebiet der Physik gründet sich auf die Maxwell'schen Gleichungen, und diese sind - im Unterschied zur klassischen Mechanik - invariant gegenüber Lorentz – Transformationen (Die klassische Mechanik ist dagegen nur invariant gegenüber Galilei – Transformationen, bei denen lediglich die Raumkoordinaten transformiert werden und in allen Bezugssystemen eine unveränderliche Zeit angenommen wird). Aus diesen und weiter gehenden Überlegungen ergibt sich eine schwer wiegende Konsequenz: Es zeigt sich, dass im Begriffsgebäude der Physik die Elektrodynamik höher angeordnet ist als die Mechanik. Dies bedeutet unter anderem, dass bei jedem Wechsel von einem

Inertialsystem zu einem anderen die Lorentz-Transformations-Gleichungen anzuwenden sind – und dies gilt nicht nur für Probleme der Elektrodynamik, sondern insbesondere auch für die Mechanik. Allerdings zeigt die spezielle Relativitätstheorie, dass die hier genannten strengen Bedingungen nur zu beachten sind, wenn die auftretenden Geschwindigkeiten im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit nicht mehr vernachlässigbar klein sind. Für (im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit) relativ kleine Geschwindigkeiten behält die klassische Mechanik ihre Gültigkeit, und sie kann als Sonderfall der speziellen Relativitätstheorie angesehen werden.

Es ist das überragende Verdienst von Albert EINSTEIN (1879 – 1955), die weitreichenden Konsequenzen dieser Vorgehensweise in physikalischer Hinsicht erkannt zu haben. Für EINSTEIN war das eingangs beschriebene Problem der „Unsymmetrie“ bei der Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder der Ausgangspunkt zur Formulierung der speziellen Relativitätstheorie und damit für die Schaffung eines neuen Weltbildes, welches das Gedankengebäude der Physik grundlegend veränderte.

Ergänzung

Bei dem oben geschilderten Problem der Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder und der damit verbundenen Frage, welche Kräfte dabei auftreten, soll noch ein Blick auf die Größe dieser Kräfte geworfen werden. Um die mathematische Behandlung möglichst einfach zu gestalten wird bei der Berechnung der Beträge F_C und F_L von Coulomb – Kraft und der Lorentz – Kraft die folgende einfache Konstellation gewählt. Im gewählten Bezugssystem bewege sich ein punktförmiges Gebilde mit der elektrischen Ladung $+Q$ und ein weiteres punktförmiges Gebilde mit der elektrischen Ladung $+q$ mit der konstanten Geschwindigkeit v im Abstand r von einander. Es sollen weiter die Kräfte betrachtet werden, die von dem Gebilde mit der Ladung $+Q$ auf das Gebilde mit der Ladung $+q$ ausgeübt werden.

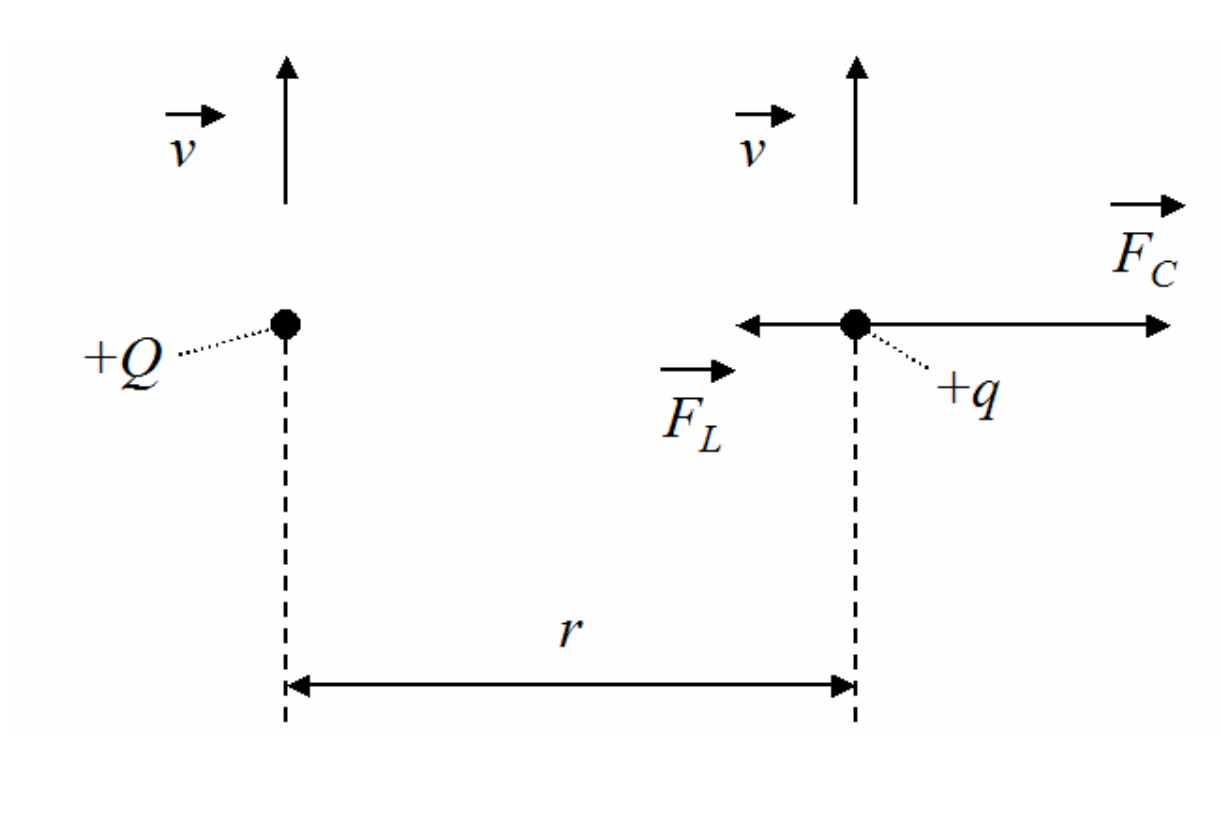


Abb. 6.3.3: Im gegebenen Bezugssystem bewege sich ein punktförmiges Gebilde der elektrischen Ladung $+Q$ mit der konstanten Geschwindigkeit \vec{v} . Weiter soll sich im festen Abstand \vec{r} ein zweites punktförmiges Gebilde der elektrischen Ladung $+q$ ebenfalls mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegen. Das Gebilde mit der Ladung $+Q$ übt dann auf das Gebilde mit der Ladung $+q$ zwei Kräfte aus: Eine abstoßende Coulomb-Kraft \vec{F}_C und eine anziehende Lorentz-Kraft \vec{F}_L .

Unter diesen Voraussetzungen gilt für die diesbezügliche abstoßende Coulomb – Kraft

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} .$$

Nach dem Biot-Savart'schen Gesetz beträgt die Flussdichte B des Magnetfeldes, das von der strömenden Ladung $+Q$ im Abstand r am Ort der punktförmigen Ladung $+q$ erzeugt wird:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q \cdot v}{r^2} .$$

Weiter gilt für den Zusammenhang zwischen der Lichtgeschwindigkeit c und den elektrischen und magnetischen Feldkonstanten ϵ_0 und μ_0 die Gleichung:

$$c^2 = \epsilon_0^{-1} \mu_0^{-1} ; \quad \mu_0 = \epsilon_0^{-1} c^{-2} .$$

Mit dieser Beziehung folgt für B :

$$B = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{v}{c^2} .$$

Im betrachteten Beispiel steht der Vektor der Flussdichte senkrecht auf der Zeichenebene und ist vom Betrachter weg gerichtet. Weiter stehen die Vektoren von Flussdichte, Geschwindigkeit und Abstand senkrecht auf einander, so dass die auf die punktförmige Ladung $+q$ wirkende Lorentz-Kraft zur Ladung $+Q$ hin gerichtet ist. Es ergibt sich:

$$F_L = q \cdot v \cdot B$$

$$F_L = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q q}{r^2} \cdot \frac{v^2}{c^2} .$$

$F_L = F_C \cdot (v^2 / c^2) .$

Unter den genannten Voraussetzungen ist die Lorentz – Kraft im Vergleich zur Coulomb – Kraft von der Größe eines relativistischen Effektes. Dies ist teilweise darauf zurück zu führen, dass bei den hier auftretenden Stromstärken die Strömungsgeschwindigkeit der Ladungsträger außerordentlich klein ist. Des ungeachtet kann die Lorentz-Kraft bei besonderen Versuchsbedingungen zu makroskopischen Effekten führen. Erwähnt sei die Messung der Größe (e/m) mit dem Fadenstrahlrohr; in diesem Fall bewegt sich ein Elektronenstrahl unter dem Einfluss der Lorentz-Kraft in einem Magnetfeld auf einer Kreisbahn. Die Geschwindigkeit der Elektronen beträgt dabei ungefähr 3% der Lichtgeschwindigkeit und die Masse der Teilchen, auf welche die Lorentz-Kraft wirkt, ist sehr klein; dies führt zu dem genannten deutlichen Effekt.

VII. Anhang: Ergänzungen

In den vorangegangenen Darlegungen wurden aus Gründen der leichteren Übersicht an einzelnen Stellen umfangreichere mathematische Behandlungen ausgespart. Es genügte in diesen Fällen wohl der Hinweis auf das Ergebnis, ohne dass dadurch das Verständnis für den Zusammenhang beeinträchtigt wurde. An dieser Stelle soll - mindestens teilweise - eine etwas ausführlichere quantitative Behandlung nachgeholt werden. Gleichzeitig werden einige besondere Probleme besprochen, welche von grundlegendem Interesse sind.

1. Gerät zur Messung der elektrischen Ladung

Die quantitative Bestimmung der elektrischen Ladung eines Körpers ist bei vielen Versuchen eine wichtige Aufgabe. Heute kann mit entsprechenden Geräten diese Messung präzise gelöst werden. Dabei stützt man sich auf eine umfassende Kenntnis der Elektrizitätslehre und einen langen Forschungsprozess und kann dann letztlich ein hervorragendes Messgerät präsentieren. Wie bereits mehrfach betont, stellt sich die vorliegende Abhandlung unter anderem die folgende didaktische Aufgabe: Es soll nicht nur dargestellt werden wie man vorhandenes Wissen an Schüler und Studenten weiter vermitteln kann, sondern es soll darüber hinaus gezeigt werden, auf welchem Wege die Physiker im Laufe der Zeit ihr heute verfügbares Wissen erworben haben. Dies geschieht aus der Überzeugung heraus, dass man das Werk der Naturwissenschaftler als Kulturleistung der Menschheit nur dann angemessen würdigen kann, wenn man – zumindest teilweise – den steinigen Weg der Erkenntnisgewinnung kennen gelernt hat. In diesem Sinne soll versucht werden, mit vereinfachenden und idealisierenden Annahmen einen Plan für die Konstruktion eines Messgerätes zu entwickeln, mit dessen Hilfe die elektrische Ladung auf einer Konduktorkugel gemessen werden kann. Zur Verfügung stehen uns dabei grundlegende Kenntnisse der Elektrizitätslehre, also das Coulomb'sche Gesetz und die

experimentellen Erfahrungen über die Weiterleitung von elektrischen Ladungen, die sich im Wesentlichen aus die Vorstellung eines „elektrischen Fluidums“ und seine Ausbreitung in elektrischen Leitern stützen. Bei dieser Aufgabenstellung ergeben sich mehrere Schwierigkeiten, die in den nachfolgend aufgeführten Schritten behandelt werden sollen.

Erster Schritt

Die erste Schwierigkeit besteht darin, dass wir die gesamte elektrische Ladung, welche sich auf der Konduktorkugel befindet, messen wollen, und dass folglich diese Ladung von der Konduktorkugel auf das Messgerät übertragen werden muss.

Zur Lösung dieser Aufgabe wird vorausgesetzt, dass ein Gerät zum qualitativen Nachweis der Existenz elektrischer Ladungen bekannt ist, nämlich das an anderer Stelle beschriebene „Elektroskop“. Berühren wir jetzt mit der geladenen Konduktorkugel den Metallstab des Elektroskops, so fließt ein mehr oder weniger großer Teil der Ladungsträger von der Konduktorkugel auf den fest stehenden Metallstab und den beweglichen Metallzeiger des Elektroskops, ein Teil der Ladungsträger verbleibt aber nach wie vor auf der Konduktorkugel. Dies hat zur Folge, dass der Zeigerausschlag des Elektroskops nicht die gesamte elektrische Ladung anzeigt, welche man messen möchte, sondern nur einen Teil derselben. Zur vollständigen Erfassung der Ladung auf der Konduktorkugel muss man also einen Weg finden, wie die gesamte zu messende elektrische Ladung von der Konduktorkugel auf das Messgerät übertragen werden kann.

Eine Lösung der gestellten Aufgabe bietet der „Faraday’sche Becher“; in unserem Fall ist dies ein oben offenes zylindrisches Metallgefäß, welches auf den fest sitzenden Stab des Messinstrumentes elektrisch leitend aufgesteckt wird. Bringt man jetzt die elektrisch geladenen Konduktorkugel in das Innere des Metallbechers und berührt damit die Innenwand des Bechers, so geht die gesamte elektrische Ladung der Konduktorkugel von dieser auf den Becher und auf die anderen (elektrisch leitenden) Teile des Messwerkes unseres Gerätes über. Die dann elektrisch

neutrale Konduktorkugel wird anschließend aus dem Becher entfernt, die gesamte zu messende elektrische Ladung befindet sich auf dem Messinstrument. Der zu Grunde liegende physikalische Tatbestand dieses Vorgangs besteht darin, dass bei einem Metall die Träger elektrischer Ladungen als ideal beweglich angesehen werden können und dass folglich im vorliegenden Fall die erwähnten Ladungsträger sich an den Außenseiten des Bechers ansammeln und folglich das Innere des Gefäßes feldfrei ist.

Zweiter Schritt

Das zweite Problem, das sich stellt, ist die folgende Frage: Wie kann man die elektrische Ladung, die sich auf den Außenseiten des Faraday'schen Bechers, des feststehenden Metallstabes und des beweglichen Metallzeigers verteilt hat, durch den Ausschlag des Zeigers gemessen werden?

Um eine Antwort auf diese Frage zu finden, müssen wir vereinfachende und idealisierende Annahmen machen. Auf der Grundlage der experimentellen Erfahrungen der Forscher des frühen 18. Jahrhunderts können wir annehmen, dass sich die elektrische Ladung gleichmäßig über die Oberflächen von Becher, Stab und Zeiger ausbreitet. Dahinter steht die Vorstellung eines „elektrischen Fluidums“, also einer „elektrischen Flüssigkeit“, die sich in dieser Weise auf der Oberfläche der beteiligten Körper ausbreitet. Mit unseren heutigen Vorstellungen können wir das folgendermaßen ausdrücken: Wir betrachten die Elektronen in metallischen Körpern als frei beweglich, die Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Elektronen auf der Oberfläche metallischer Körper von unterschiedlicher Geometrie ist eine sehr starke Idealisierung. Allerdings verbleibt uns auf der Grundlage der hier getroffenen Annahmen und der Schwierigkeiten einer weiter gehenden mathematischen Betrachtung kaum eine andere Möglichkeit.

Als nächstes soll eine quantitative Überlegung vorbereitet werden. Diese stützt sich auf den Zeigerausschlag zwischen dem feststehenden Metallstab und dem Zeiger. Dieser Ausschlag kommt durch die abstoßende Coulomb-Kraft zwischen den

Ladungen auf dem Metallstab und den Ladungen auf dem Zeiger zustande. Bezeichnen wir die für diese Kraft wirksamen Oberflächen auf dem Zeiger mit A_1 , auf dem Metallstab mit A_2 und auf dem Becher mit A_3 und die gesamte Oberfläche (auf der sich Ladungen befinden) mit A_{ges} , so folgt:

$$A_1 + A_2 + A_3 = A_{\text{ges}}$$

$$A_1 / A_{\text{ges}} + A_2 / A_{\text{ges}} + A_3 / A_{\text{ges}} = 1 .$$

Mit den Abkürzungen

$$f_1 = A_1 / A_{\text{ges}} ; \quad f_2 = A_2 / A_{\text{ges}} ; \quad f_3 = A_3 / A_{\text{ges}}$$

$$f_1 < 1 ; \quad f_2 < 1 ; \quad f_3 < 1$$

ergibt sich

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 .$$

Nimmt man weiter an, dass die gesamte von der Konduktorkugel auf das Messinstrument übertragene elektrische Ladung Q ist, so folgt unter den getroffenen Voraussetzungen für die Ladung Q_1 auf den Zeiger und für die Ladung Q_2 auf den Metallstab

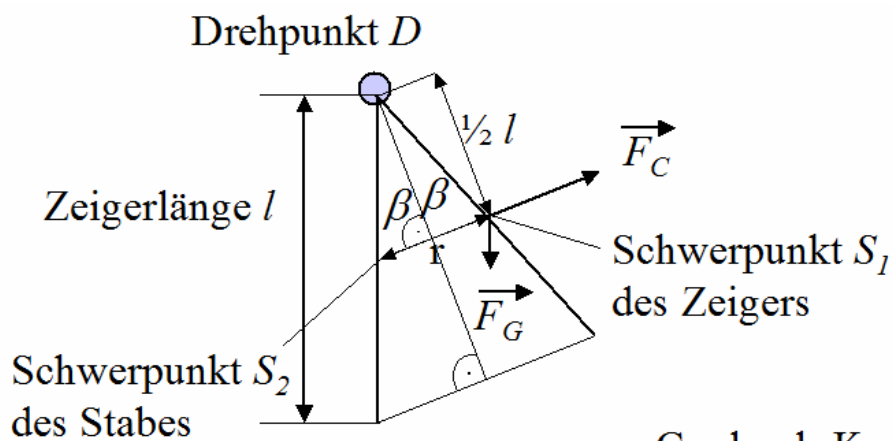
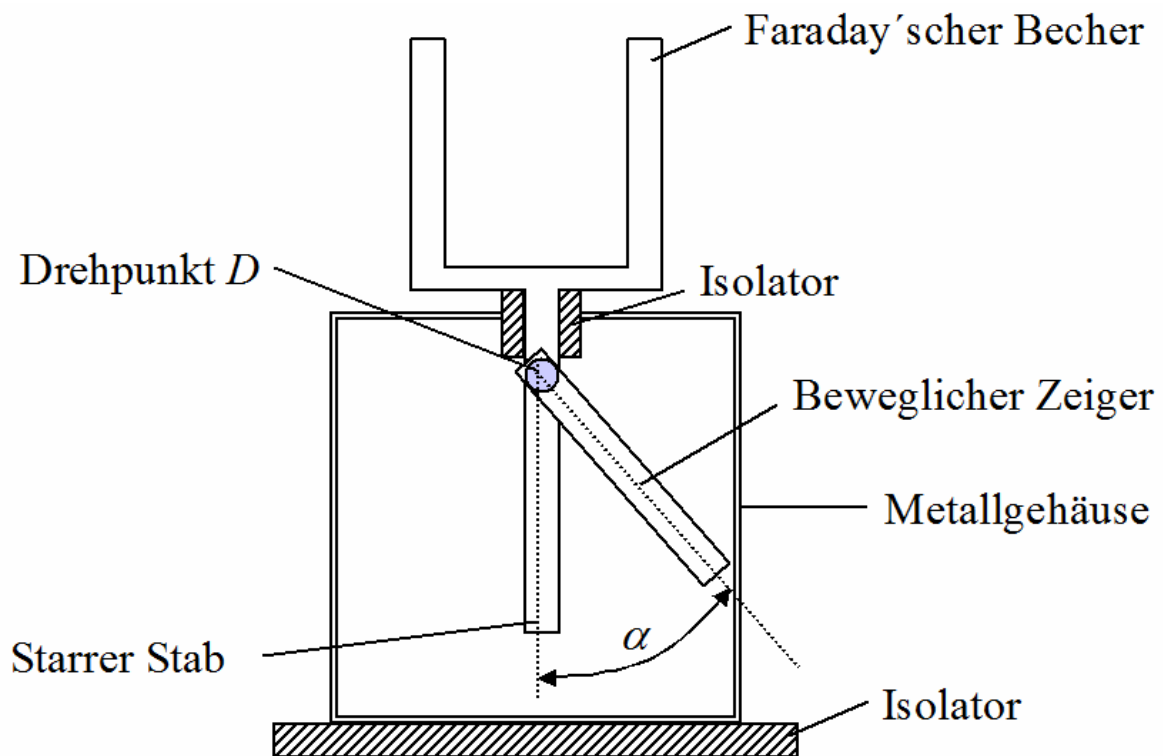
$$Q_1 = f_1 \cdot Q ;$$

$$Q_2 = f_2 \cdot Q .$$

Für den Zeigerausschlag des Messinstrumentes sind die beiden Ladungen Q_1 und Q_2 maßgebend. Daraus lässt sich mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetzes die betreffende Abstoßungskraft bestimmen.

Dritter Schritt

Im dritten Schritt müssen wir versuchen, aus der auf dem Zeiger befindlichen Ladung Q_1 und der Ladung Q_2 auf dem Metallstab mit Hilfe des Coulomb'schen Gesetzes den dazu gehörigen Ausschlag des Zeigers zu bestimmen. Die abstoßenden Coulomb – Kräfte bewirken einen Zeigerausschlag.



Coulomb-Kraft-Komponenten:

\vec{F}_C : Coulomb-Kraft

\vec{F}_G : Gewichtskraft des Zeigers

r : Abstand der Ladungs-"Schwerpunkte" von Stab und Zeiger

$\alpha = 2 \cdot \beta$: Zeigerausschlag

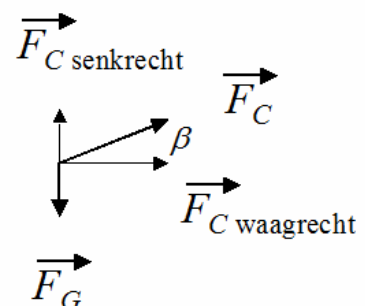


Abb. 7.1.1: Die auf dem drehbaren Zeiger und dem feststehenden Stab wirksamen elektrischen Ladungen Q_1 und Q_2 rufen die abstoßende Coulomb - Kraft F_C hervor. Im Gleichgewichtsfall ergibt sich der Zeigerausschlag mit dem Winkel α ; in diesem Fall ist die senkrecht nach oben gerichtete Komponente der Coulomb – Kraft und die Gewichtskraft des Zeigers betragsmäßig gleich groß.

Die Gewichtskraft des Zeigers ($F_G = m g$, wenn m die schwere Masse des Zeigers bedeutet) wirkt der senkrecht nach oben gerichteten Komponente der abstoßenden Kraft entgegen. Bei Gleichgewicht zwischen beiden Kräften (bzw. zwischen den beiden dazugehörigen Drehmomenten) ergibt sich ein Zeigerausschlag α (von der Senkrechten aus gemessen). Um die quantitative Betrachtung möglichst einfach zu gestalten, nehmen wir auf dem feststehenden Metallstab und auf dem beweglichen Zeiger jeweils einen Schwerpunkt der Ladungsverteilung an; diese Schwerpunkte sollen mit den Gravitationsschwerpunkten der beiden Körper zusammenfallen.

Wird weiter der halbe Zeigerausschlag mit $\beta = \alpha / 2$ und die Zeigerlänge mit l bezeichnet, so ergibt sich für den Abstand r der Schwerpunkte von Stab und Zeiger

$$r = 2 (1/2) l (\sin \beta)$$

$$r = l (\sin \beta)$$

und für die abstoßenden Coulomb – Kraft

$$F_C = (1 / 4\pi \varepsilon_o) \cdot (Q_1 Q_2 / r^2)$$

$$F_C = (f_1 f_2 / 4\pi \varepsilon_o) \cdot (Q^2 / l^2 \sin^2 \beta).$$

Die senkrecht nach oben gerichtete Komponente dieser Kraft beträgt

$$F_{C \text{ senkr}} = F_C \cdot (\sin \beta).$$

Diese Komponente der Coulomb – Kraft wirkt der Gewichtskraft des Zeigers entgegen, im Gleichgewichtsfall sind die beiden Kräfte betragsmäßig gleich groß. Dann gilt:

$$m g = (f_1 f_2 / 4\pi \varepsilon_0) \cdot (Q^2 / l^2 \sin^2 \beta) \cdot (\sin \beta)$$

$$Q^2 = (4\pi \varepsilon_0 / f_1 f_2) \cdot (m g l^2) \cdot (\sin \beta).$$

$Q^2 \sim (\sin \alpha/2).$

Die Gleichung besagt, dass das Quadrat der zu messenden elektrischen Ladung dem Sinus des Winkels des halben Zeigerausschlages proportional ist. Die Konstante ist eine Gerätekonstante und kann aus den erwähnten Daten bestimmt werden.

Zur Versuchsdurchführung sollen noch einige Hinweise gegeben werden. Um das Messgerät vor dem Einfluss des elektrischen Erdfeldes abzuschirmen muss man das Gerät mit einem Metallgehäuse umgeben; lediglich Vorder- und Rückseite können - zur besseren Registrierung des Zeigerausschlages - aus Glas bestehen. Durch diese Maßnahme ist dann das Innere des Messinstrumentes feldfrei, sofern sich keine Träger elektrischer Ladungen im Gehäuse isoliert von den Wänden befinden. Durch das Einbringen der zu messenden elektrischen Ladung in das Innere des Gehäuses ist dies jedoch der Fall, und auf Grund von Influenz ändert sich dadurch die Ladungsverteilung. Die Folge sind Kräfte zwischen dem Metallgehäuse und dem Zeiger. Bei der vorliegenden Betrachtung wird dieser Störeffekt außer Betracht gelassen.

Es ist die didaktische Absicht, Aufbau und Funktionsweise des hier beschriebenen Gerätes zur Messung einer elektrischen Ladung auf überschaubare Grundtatsachen der Elektrizitätslehre zurück zu führen. Die Genauigkeit eines solchen Instrumentes ist zwangsläufig beschränkt. Eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit kann erreicht werden, wenn man weiter gehende

Kenntnisse der Elektrizitätslehre zur Entwicklung eines Messgerätes heranzieht. Grundlage eines solchen Prinzips ist der Tatbestand, dass ein elektrisches Feld bekannter Größe auf eine in das Feld eingebrachte Ladung q betragsmäßig die Kraft

$$F = q E$$

ausübt. Benützt man als Feld dasjenige zwischen den Platten eines Plattenkondensators, so ist seine Größe durch die Beziehung

$$E = U / d$$

gegeben. Dabei ist U die an den Platten anliegende Spannung, d ist der Plattenabstand. Die zu messende elektrische Ladung wird jetzt auf einen dünnen Draht aufgebracht, welcher senkrecht zum Feldverlauf gespannt ist. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes verformt sich der Draht geringfügig, und dies kann mit einem Mikroskop sehr genau gemessen werden. Aus der mechanischen Deformation lässt sich die wirkende Kraft ermitteln, und daraus folgt die Größe der elektrischen Ladung. Das Verfahren ist sehr präzise und gestattet mit den heutigen Geräten eine Messgenauigkeit in der Größenordnung von 10^{-14} C.

2. Quantitative Beschreibung der elektrischen Spannung

Eine quantitative Beschreibung des Begriffs der elektrischen Spannung kann von zwei Teilgebieten der Physik ausgehen, von der Elektrostatik und von der Elektrodynamik. Auf dem Gebiet der Elektrostatik ist der Ausgangspunkt der Betrachtung die Tatsache, dass eine elektrische Quelle Energie an ein angeschlossenes Elektrogerät abgibt, und die Problemfrage lautet: Wie kann in der elektrischen Quelle diese Energie bereit gestellt und berechnet werden? Im Bereich der Elektrodynamik stützt sich die Betrachtung auf die zweite Maxwell'sche Gleichung und geht der Frage nach, wie das dabei auftretende elektrische Feld eine Trennung von Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens

bewerkstelligt. Hier soll zunächst das Problem vom Boden der Elektrostatik aus behandelt werden, anschließend der allgemeinere Fall von der Elektrodynamik aus.

Erste Betrachtungsweise

In einem geschlossenen elektrischen Leiterkreis liefert die elektrische Quelle Energie an das angeschlossene Elektrogerät. Es besteht also ein kontinuierlicher Energiestrom in einer Richtung vom Lieferanten (elektrische Quelle) zum Abnehmer (Elektrogerät). Damit die elektrische Quelle dies leisten kann müssen in ihrem Innern Prozesse ablaufen, welche die Bereitstellung der Energie besorgen. Konkret bedeutet dies, dass in der Quelle unter Energieaufwand Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens getrennt und an den Polen der Quelle zur Verfügung gestellt werden. Die zur Ladungstrennung erforderliche Energie lässt sich in der nachfolgend beschriebenen Weise berechnen, und daraus kann dann der Begriff der elektrischen Spannung hergeleitet werden. Diese Vorgehensweise geschieht über die folgenden physikalischen Größen

Potentielle Energie

Potential

Potentialdifferenz

in mehreren Schritten.

- Potentielle Energie

Zur Berechnung der potentiellen Energie, die in einer Batterie verfügbar ist, wird ein sehr stark vereinfachtes Modell betrachtet. Eine Metallkugel vom Radius r_k sei im Ursprung des gewählten Koordinatensystems fixiert, auf der Oberfläche der Kugel befinde sich die Ladung $(-Q)$. Weiter soll das betrachtete physikalische System aus einem punktförmigen Gebilde der

elektrischen Ladung $(+q)$ bestehen. Dieses Gebilde soll sich zu Beginn der Überlegung an der Oberfläche der als ortsfest angesehen Kugel befinden. Um die Ladung $(+q)$ von der Kugeloberfläche auf einen Punkt im Abstand r zu entfernen ist eine Überführungsarbeit nötig, welche sich aus der von außen angreifenden Kraft und dem zurückgelegten Weg berechnet. Diese äußere Kraft ist der vorliegenden Coulomb-Kraft entgegengesetzt gleich gerichtet, es ergibt sich also für die Überführungsarbeit der Ausdruck

$$\Delta W = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \int_{r_K}^r \frac{Qq}{r^2} dr$$

$$\Delta W = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_o} * \left[-\frac{1}{r} + \frac{1}{r_K} \right]$$

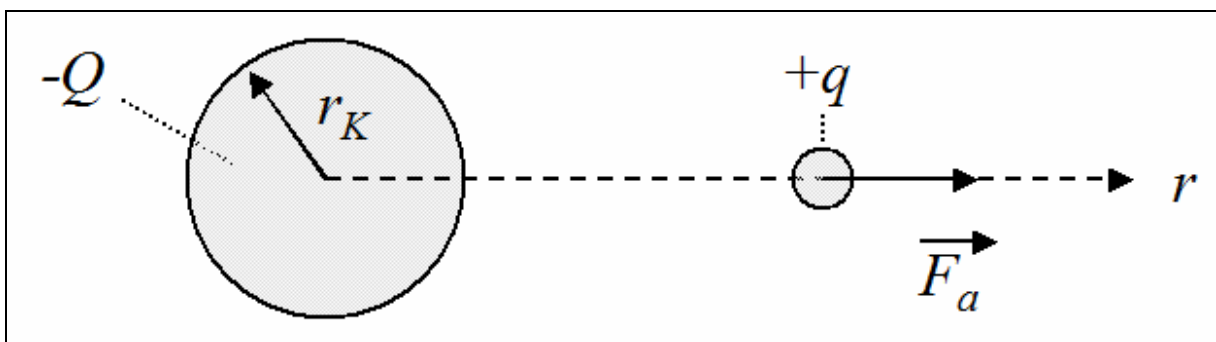


Abb. 7.2.1: Zur Berechnung der Überführungsarbeit beim Entfernen der positiven Ladung $(+q)$ von der negativen Ladung $(-Q)$, welche sich auf der Oberfläche einer Kugel vom Radius r_K befindet.

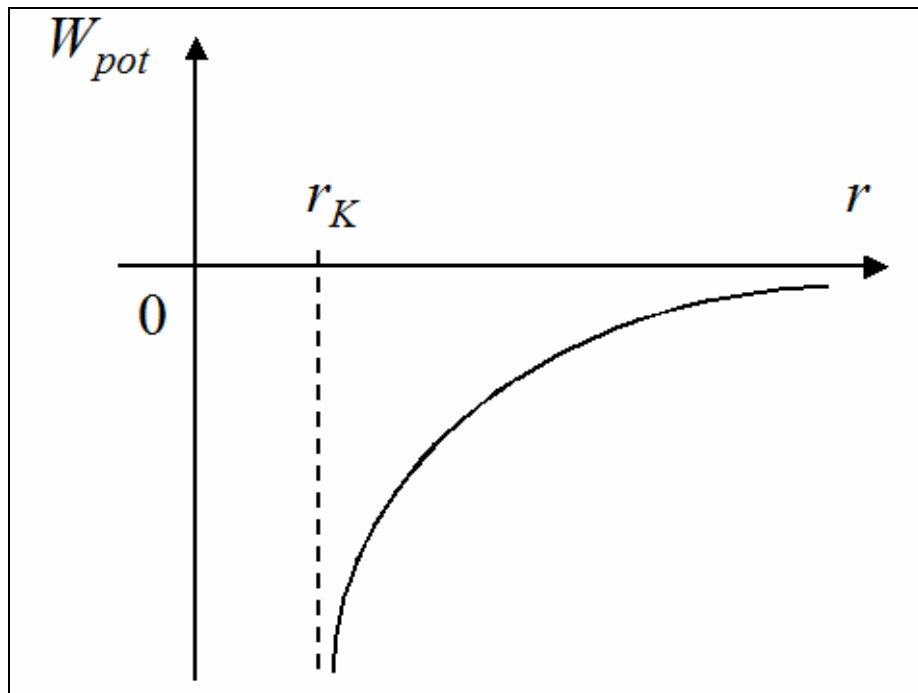


Abb. 7.2.2: Verlauf der potentiellen Energie eines Systems aus zwei Trägern elektrischer Ladungen mit unterschiedlichem Vorzeichen in Abhängigkeit von deren Abstand r . Die Ladung $-Q$ befindet sich dabei auf der Oberfläche einer Kugel vom Radius r_K , der Mittelpunkt dieser Kugel liegt im Ursprung des gewählten Koordinatensystems. Der punktförmig gedachte Träger mit der Ladung $+q$ wird durch die Einwirkung einer von außen angreifenden Kraft von der fixierten großen Kugel entfernt (vgl. Abb. 7.2.1).

Diese Arbeit ist im System als potentielle Energie gespeichert. Zur vollständigen Beschreibung dieser potentiellen Energie ist eine additive Konstante erforderlich, die frei gewählt werden kann. Es ist zweckmäßig diese Konstante so zu wählen, dass Vergleiche mit ähnlich aufgebauten Systemen leicht durchzuführen sind; es empfiehlt sich daher, die Konstante für einen unendlich großen Abstand gleich null zu setzen. Damit ergibt sich für die potentielle Energie unseres Systems

$$W_{\text{pot}} = - \frac{Q q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} .$$

Der Tatbestand, dass diese potentielle Energie für $r > 0$ negative Werte besitzt, mag zunächst überraschen. Zurückzuführen ist dies auf die Wahl der Konstanten.

Es sei daran erinnert, dass sich eine ganz ähnliche Situation bei der Berechnung der potentiellen Energie eines Systems ergibt, welches aus einem Körper im Gravitationsfeld der Erde besteht.

Das wesentliche Ergebnis der vorausgegangenen Betrachtung ist die Erkenntnis, dass bei einer elektrischen Quelle die Bereitstellung von Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens nur durch Aufwand von Energie möglich ist. Diese Energie ist durch Vorgänge im Innern der elektrischen Quelle verfügbar – bei einer Batterie durch chemische Prozesse, bei einem Generator durch die zugeführte mechanische Energie.

- Potential

An dieser Stelle soll zwischen der potentiellen Energie des betrachteten Systems und dem entsprechenden elektrischen Potential deutlich unterschieden werden. In dem hier betrachteten System (bestehend aus der großen Kugel mit der Ladung $-Q$ und dem punktförmigen Gebilde der Ladung $+q$) hängt die potentielle Energie entscheidend von der felderzeugenden Ladung $-Q$ und der in das elektrische Feld eingebrachten Ladung $+q$ ab. Mit dieser Formulierung soll ausgedrückt werden, dass den beiden Ladungen - an dieser Stelle der Betrachtung - unterschiedliche Funktionen zugeschrieben werden: Die Ladung $-Q$ auf der Kugel erzeugt ein elektrisches Feld, das punktförmige Gebilde mit der Ladung $+q$ wird in dieses Feld eingebracht. Je nach der Größe der elektrischen Ladung $+q$ ergibt sich ein unterschiedlicher Wert für die potentielle Energie des Systems; will man den Einfluss dieses Parameters eliminieren, so kann dies durch eine „Normierung der potentiellen Energie des Systems“ geschehen. Im vorliegenden Fall dividiert man dazu die potentielle Energie des Systems durch die eingebrachte elektrische Ladung $+q$. Man erhält dann eine neue physikalische Größe, das elektrische Potential V_{el} .

Es gilt:

$$\text{El. Potential} = \frac{\text{Potentielle Energie des Systems}}{\text{Größe der eingebrachten el. Ladung}}$$

$$V_{\text{el}} = W_{\text{pot}} / q$$

$$V_{\text{el}} = - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} .$$

Im SI – System ist die Maßeinheit des elektrischen Potentials 1 J C^{-1} .

- Potentialdifferenz

Mit der Einführung des elektrischen Potentials ist der Weg geebnet für den Begriff der elektrischen Spannung; diese ist definiert als Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten des elektrischen Potentials. Für die elektrische Spannung U gilt somit

$$U = \Delta V_{\text{el}} .$$

Eine anschauliche Deutung des Begriffes der elektrischen Spannung erhält man, wenn die Ladung $(+q)$ unter der Einwirkung der Ladung $(-Q)$ von r_K nach r verschoben wird ($r_K < r$). Für die an dieser Stelle definierte Spannung U folgt dann:

$$U = - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_K} \right) .$$

$$U = (Q / 4\pi\epsilon_0) \cdot [(1/r_K) - (1/r)]$$

$$U > 0, \text{ da } Q > 0 \text{ und } r_K < r$$

$$U = \text{const.} \cdot Q.$$

Die Konstante hängt dabei von der Dimensionierung der experimentellen Anordnung ab. Verdeutlicht werden kann dies dadurch, dass von den Polen einer Hochspannungsquelle mit zwei Konduktoren mehrmals Ladungen abgeschöpft und über zwei Faraday'sche Becher den Anschlüssen eines elektrostatischen Spannungsmessers zugeführt werden.

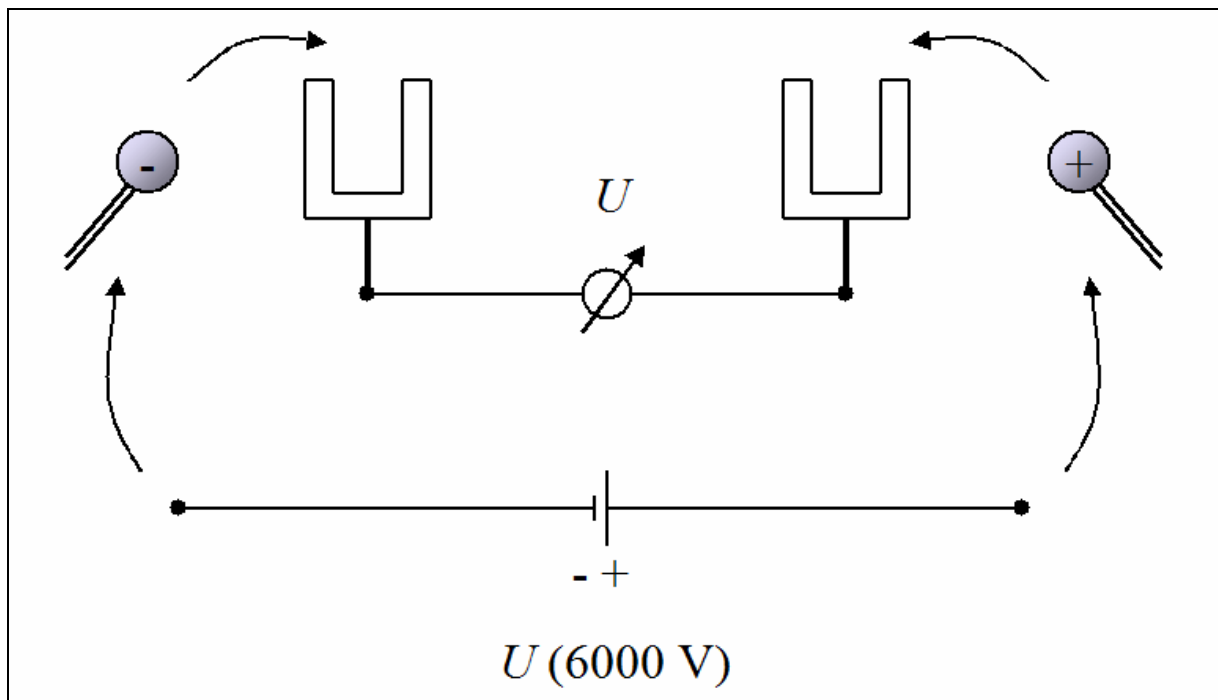


Abb. 7.2.3: Experimentelle Verdeutlichung des Zusammenhanges, dass die elektrische Spannung U der Größe der getrennten elektrischen Ladung proportional ist. Die Ladungen werden von den Polen einer Hochspannungsquelle mit Konduktoren abgeschöpft und an den Innenseiten zweier Faraday'scher Becher vollständig abgegeben. Mit zunehmender Ladung auf den Elektroden des Spannungsmessers wächst die elektrische Spannung.

Die Einheit der elektrischen Spannung ist diejenige des elektrischen Potentials, also 1 J C^{-1} . Zu Ehren von Alessandro VOLTA wird diese Einheit als 1 Volt (1 V) bezeichnet. Damit ist die Einheit „1 V“ eine abgeleitete Einheit, die sich aus den Einheiten der Basisgrößen des SI – Systems ergibt. Für Messungen ist die experimentelle Realisierung eines genauen Spannungswertes von Bedeutung; dazu dienen Normalelemente, wie beispielsweise das Weston – Element, das bei einer Temperatur von 20° C die Spannung $1,01865 \text{ V}$ besitzt. Verwendet werden solche Normale als Bezugsspannungen bei Kompensationsmessungen. Für schulische Belange der Sekundarstufe I mag genügen, dass das Volta - Element aus Kupfer und Zink etwa die Spannung 1 V liefert.

Zweite Betrachtungsweise

Die vorausgegangene erste Betrachtungsweise zur Herleitung des Begriffs der elektrischen Spannung geht von der Elektrostatik aus und gelangt zu einer verhältnismäßig anschaulichen Vorstellung dieser physikalischen Größe. Grundlage dieser Betrachtungsweise ist der Tatbestand, dass zur Trennung von Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens Energie erforderlich ist. Eine andere Betrachtungsweise stützt sich auf die Elektrodynamik, hier auf die zweite Maxwell'sche Gleichung. Diese besagt, dass ein sich im Laufe der Zeit änderndes Magnetfeld von einem ringförmig geschlossenen elektrischen Feld umgeben ist, welches ohne die Existenz von Ladungsträgern charakterisiert werden kann. Dieser grundlegende Unterschied zur Elektrostatik kann experimentell an Hand des elektromagnetischen Induktionsgesetzes demonstriert werden: Ein Leitungsdraht umschließt das sich ändernde Magnetfeld, und als Folge davon ist zwischen den Enden des Drahtes eine elektrische Spannung nachweisbar. Mathematisch beschrieben werden kann dies durch die Gleichung

$$U = - \int_{S_1}^{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} .$$

Im Rahmen einer konkreten Vorstellung besagt die Gleichung folgendes: In dem hier angesprochenen elektrischen Feld besteht zwischen einem Punkt 1 und einem Punkt 2 die elektrische Spannung U . Aus den Betrachtungen der Elektrostatik lässt sich dieser Zusammenhang grundsätzlich auch herleiten, wie an anderer Stelle gezeigt wurde.

Der Unterschied zur Elektrodynamik besteht jedoch darin, dass in der Elektrostatik zur Herstellung eines elektrischen Feldes stets Träger elektrischer Ladungen existieren müssen, wohingegen in der Elektrodynamik das elektrische Feld ohne Ladungsträger besteht.

Das negative Vorzeichen in der obigen Gleichung sollte nicht irritieren. Es kommt dadurch zustande, dass die Richtung des elektrischen Feldes so definiert ist, dass die zwischen den Ladungsträgern unterschiedlichen Vorzeichens wirkenden Kräfte den Abstand zwischen den Ladungsträgern zu verkleinern suchen, während zu einer Vergrößerung der elektrischen Spannung eine von außen angreifende Kraft nötig ist, die so gerichtet sein muss, dass sie den Abstand zwischen den erwähnten Ladungsträgern vergrößert. Bei Beachtung dieses Sachverhaltes ergibt die obige Gleichung für die elektrische Spannung U einen positiven Wert.

Ergänzung

Die oben genannte allgemeine Beziehung zwischen dem elektrischen Feld und der elektrischen Spannung findet in der Praxis zwei wichtige Anwendungen, die an dieser Stelle erwähnt werden sollen.

- Die oben angegebene allgemeine Beziehung für die elektrische Spannung findet beim homogenen Feld des Plattenkondensators eine oft benutzte Anwendung. Es gilt in diesem Fall für die Beträge der beteiligten physikalischen Größen:

$$U = E \cdot d ,$$

wobei U die am Kondensator angelegte Spannung, E die elektrische Feldstärke zwischen den Platten und d den Plattenabstand bedeuten. Die Gleichung gestattet eine direkte Bestimmung der elektrischen Feldstärke aus der zwischen den Platten bestehenden Spannung und dem Plattenabstand.

- Eine weitere Anwendung der obigen Beziehung ist die Berechnung der kinetischen Energie von Elektronen nach Durchlaufen eines elektrischen Feldes; dieses sei im betrachteten Fall als homogenes Feld zwischen den Platten eines Plattenkondensators realisiert. Zwischen den Platten liege die Spannung U , die Elektronen sollen nach ihrem Austritt aus der Metalloberfläche (welche mit dem negativen Pol der elektrischen Quelle verbunden ist) die Geschwindigkeit null besitzen. Dies soll als „Zustand I“ bezeichnet werden. Der „Zustand II“ liege vor, wenn die Elektronen nach Durchlaufen des elektrischen Feldes – wobei sie von diesem Energie aufnehmen, also bildlich gesprochen in dem Feld „nach unten fallen“ - mit der Geschwindigkeit v an der positiv geladenen Platte ankommen. Nach dem Energiesatz gilt dann für die in den Zuständen I und II beteiligten potentiellen und kinetischen Energien der Elektronen:

$$(\Delta W_{\text{pot}})_I + (\Delta W_{\text{kin}})_I = (\Delta W_{\text{pot}})_{II} + (\Delta W_{\text{kin}})_{II}$$

$$e U + 0 = 0 + (1/2) m v^2 ,$$

wobei e den Betrag der Elektronenladung und m die Masse der Elektronen bedeutet. Daraus lässt sich die kinetische Energie der Elektronen nach Durchlaufen des elektrischen Feldes berechnen. Da weiter die Ladung e der Elektronen und ihre Masse m bekannt sind, so ergibt sich daraus ihre Geschwindigkeit v . Diese hat bei einer Spannung von 300 V einen Wert von ungefähr 10.000 km/s, was 3 % der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Hinweis

An dieser Stelle soll noch ein Hinweis über die von Hochspannungen ausgehenden Gefahren gegeben werden. Für einen Schüler ist es sehr überraschend, dass die mit einer Influenzmaschine erzeugten großen Spannungen von mehreren hunderttausend Volt relativ ungefährlich sind, wogegen die mit einem Hochspannungstransformator (aus Aufbauteilen) hergestellte Spannung von 10.000 V für einen Menschen höchste Lebensgefahr bedeutet. Die damit verbundenen Sachverhalte sollen hier kurz aufgezeigt werden.

In der Elektrostatik kann man durch Berührung zweier Stoffe hohe Spannungen (im kV - Bereich) erhalten. Diese hohen Spannungen sind i.a. für den Menschen ungefährlich - im Gegensatz zu den hohen Spannungen bei Überlandleitungen. Der Grund dafür kann der Definition der elektrischen Spannung - als Quotient aus der zur Ladungstrennung erforderlichen Energie und der Größe der getrennten Ladung - entnommen werden; dieser Quotient kann sehr groß sein, auch wenn die in Zähler und Nenner stehenden Größen sehr klein sind. Dies ist bei den erwähnten Versuchen der Elektrostatik der Fall. Unter geringer Energiezufuhr werden kleine Ladungen beiderlei Vorzeichens getrennt, die resultierende Spannung ist sehr groß. Bei Berührung geht nur eine kleine Energie auf den Menschen über, und diese ist i.a. ungefährlich – dies nicht zuletzt deshalb, weil keine Energie nachgeliefert wird.

Völlig anders dagegen ist die Situation bei einer Überlandleitung oder bei dem im Unterricht mit Aufbauteilen demonstrierten Hochspannungsversuch. Hier ist die Spannung durch Trennung großer Ladungen unter hohem Energieaufwand entstanden; bei Berührung fließt ein gewaltiger Energiestrom, der durch ständige Nachlieferung von Energie aufrecht erhalten wird, was **höchste Lebensgefahr bedeutet**.

3. Der Gleichstrommotor

Nach der Behandlung des Gesetzes über die elektromagnetische Induktion hatten wir zwei wichtige Anwendungen kennen gelernt, nämlich den Generator und den Transformator. Die beiden Geräte dienen der Bereitstellung und der Übertragung von elektrischer Energie, besonders im großtechnischen Maßstab. Jetzt soll noch ein weiteres elektrisches Gerät behandelt werden, der Elektromotor; es ist eine Maschine, welcher elektrische Energie zugeführt wird, die diese Energie umwandelt und dann nach außen als mechanische Energie abgibt. Im täglichen Leben begegnet uns der Elektromotor in vielfältigen Varianten, angefangen im Haushalt als Rührwerk in der Küche über eine elektrische Bohrmaschine und den Anlasser im Fahrzeug bis hin zu Großgeräten wie dem Motor in der Lokomotive eines ICE.

Will man mit den Schülern den Elektromotor „erfinden“, so führt ein möglicher Weg über den Generator, in unserem Fall über den hier vorgestellten Wechselstromgenerator. Dieses Gerät ist ein „Energiewandler“ - die von außen zugeführte mechanische Energie wird auf der Grundlage des Gesetzes von der elektromagnetischen Induktion in elektrische Energie umgewandelt, an den Klemmen des Gerätes steht eine Wechselspannung zur Verfügung. Diesen Prozess kann man nun mit ein und demselben Gerät umkehren: Man schließt an die Klemmen des Generators eine Wechselspannung an, der Rotor des Gerätes beginnt sich zu drehen und erhält auf diese Weise Rotationsenergie, die nach außen abgegeben werden kann - der Wechselstrommotor ist kreiert. Diese Vorgehensweise soll hier nicht weiter verfolgt werden, sie zeigt jedoch zwei wesentliche Bauelemente des Elektromotors:

- Bauelement 1: Man benötigt ein Magnetfeld, das durch einen Dauermagneten oder durch einen Elektromagneten hergestellt wird.

- Bauelement 2: Man benötigt eine um eine Achse drehbar gelagerte Schleife oder Spule, die von Trägern elektrischer Ladungen durchströmt wird (Die Orientierung der Achse muss quer zur Richtung des Magnetfeldes verlaufen).

Nach der Betrachtung des Aufbaus des Elektromotors soll jetzt der Blick auf die Funktionsweise des Gerätes gerichtet werden. Die Drehbewegung der Leiterschleife (bzw. der Spule) des Elektromotors kommt dadurch zustande, dass die Träger von zwei Magnetfeldern miteinander in Wechselwirkung treten. Zum einen ist es das im Raum ruhende Magnetfeld des Permanentmagneten (bzw. des Elektromagneten), zum anderen ist es das Magnetfeld, welches (nach Oersted) durch den Ladungsträgerstrom in der Leiterschleife entsteht. Die Träger dieser beiden Magnetfelder üben aufeinander anziehende und abstoßende Kräfte aus und bewirken so die Drehbewegung der Leiterschleife.

Für die Behandlung des Elektromotors in der Sekundarstufe I soll hier aus Gründen des einfachen Zugangs nicht der Wechselstrommotor, sondern der Gleichstrommotor gewählt werden. Dafür stehen zwei methodische Wege zur Verfügung, die nachfolgend vorgestellt werden sollen.

Erster methodischer Weg

Die tragende Säule dieses Unterrichtsgangs ist die stromdurchflossene Spule; ihr Magnetfeld wird in Analogie zum Magnetfeld des Stabmagneten gesehen (wobei das durch die Spule erzeugte Magnetfeld Vorteile besitzt, da es aus- und eingeschaltet werden und in seiner Stärke verändert werden kann). Auf dieser Säule baut die unterrichtliche Behandlung des Elektromagnetismus auf, andere Aspekte – wie beispielsweise das Magnetfeld in der Umgebung eines stromdurchflossenen geraden Leiters oder die Lorentz-Kraft – treten demgegenüber bewusst in den Hintergrund.

Die Funktionsweise eines Gleichstrommotors kann nach dieser Vorüberlegung in Anlehnung an den Aufbau des Motors erklärt werden. Die Spule ist zwischen den Polen eines Dauermagneten um eine Achse quer zu dessen Richtung drehbar angeordnet. Die

Magnetpolung der Spule hängt von der Stromrichtung in der Spule und von deren Wicklungssinn ab. Liegt z.B. neben dem Nordpol des äußeren Feldmagneten der Südpol der Spule, so erfolgt eine Drehbewegung der Spule zum Nordpol des Feldmagneten hin (entsprechendes gilt für den Südpol des Feldmagneten und das andere Spulenende). Nach Beginn der Drehung kommt diese dann zum Erliegen, wenn sich zwei entgegengesetzte Magnetpole gegenüber stehen („Totpunkt“). Eine Fortführung der Drehung ist nur möglich, wenn in dieser Stellung der Spule die Richtung der Stromzufuhr umgepolt wird. Erreicht werden kann dies auf mechanischem Wege durch einen besonderen Schalter, einen Stromwender („Kommutator“), welcher in jeder Stellung der Spule für die richtige Stromrichtung sorgt. Bei einer einzigen Leiterschleife besteht der Stromwender aus zwei gegeneinander isolierten Halbringen, welche über zwei Schleifkontakte (Kohlebürsten) mit der Batterie verbunden sind. Durch den Kommutator erfolgt die Umpolung der Stromzufuhr in dem Augenblick, in welchem sich die rotierende Spule im Totpunkt befindet; infolge der Trägheit dreht sich die Spule weiter, nach der Umpolung erfolgt Abstoßung durch den Feldmagneten, die Drehung der Spule wird auf diese Weise kontinuierlich vorangetrieben.

Der auf diese Weise beschriebene Gleichstrommotor ist funktionsfähig, besitzt aber noch Nachteile, von denen zwei besonders genannt werden sollen. Die bei laufendem Motor an der Drehachse verfügbare Kraft (genauer: das an der Achse verfügbare Drehmoment) ist klein, und der Motor läuft in ungünstiger Stellung der Spule nicht von selbst an, er muss angestoßen werden. Zur Vergrößerung der an der Achse verfügbaren Kräfte kann man folgendes tun: Man bettet die Wicklungen der Spule in die Nuten eines Eisenzylinders und verstärkt so das Magnetfeld der Spule. Wegen seiner Ähnlichkeit mit einem doppelten T wird diese Art des „Läufers“ Doppel-T-Anker genannt.



Abb. 7.3.1: Das Bild zeigt einen einfachen Gleichstrommotor im Feld eines Dauermagneten. Die Spule des Rotors wird von einer Gleichspannungsquelle gespeist, die Stromzufuhr erfolgt über Schleifkontakte und den Kommutator.

Wenn man erreichen will, dass sich nach dem Start des Motors der Läufer in jeder beliebigen Stellung zu drehen beginnt, so kann man dies wie folgt bewerkstelligen: Man wickelt auf den Eisenzylinder nicht nur eine einzige Spule, sondern mehrere Spulen, die bezüglich der Drehachse gegeneinander versetzt sind. Jede dieser Spulen muss an die außen liegende Batterie angeschlossen sein, das heißt die ursprünglich vorhandenen zwei Halbringe für die Stromzuführung einer einzigen Spule müssen durch eine entsprechend große Zahl von Kontakten (die gegeneinander isoliert sein müssen) für viele Spulen ersetzt werden – aus dem Doppel-T-Anker ist ein „Trommel-Anker“

entstanden. Durch eine recht komplizierte Wicklung der einzelnen Spulen auf dem Eisenzyylinder wird erreicht, dass sich der Rotor in jeder beliebigen Stellung zu drehen beginnt.

Zweiter methodischer Weg

Der hier vorgestellte zweite Weg zur Behandlung des Gleichstrommotors ähnelt dem ersten Weg in einigen Bereichen, es gibt aber auch einen wesentlichen Unterschied. Ähnlich ist die Hinführung zu den Bauelementen des Motors und die Einsicht in die Notwendigkeit, im Totpunkt die Stromrichtung durch den Rotor umzukehren. Völlig anders gestaltet sich dieser zweite Weg jedoch bei der Antwort auf die Frage, auf welche Art und Weise die auf den Rotor wirkenden Kräfte zustande kommen. Bei dem ersten Weg bestand die Antwort darin, dass wir zwei Magnete betrachteten, die aufeinander anziehende und abstoßende Kräfte ausüben.

Der zweite Weg geht hier anders vor. Als entscheidende Ursache für die Entstehung der Drehbewegung des Rotors wird die Lorentz-Kraft gesehen. Die zentrale Aussage dieser Betrachtungsweise besagt, dass ein stromdurchflossener gerader Leiter, der quer zu einem Magnetfeld orientiert ist, eine Kraft erfährt. Bezüglich der quantitativen Beschreibung dieses Phänomens sei auf das vorausgegangene Kapitel verwiesen.

Will man diesen zweiten methodischen Weg beschreiten, so betrachtet man wieder das von einem Dauermagneten erzeugte Feld. Danach setzt aber eine andere Betrachtungsweise ein. Statt der drehbar gelagerten Spule ist es jetzt zweckmäßig, im Feld des Magneten lediglich eine einzige drehbar gelagerte Schleife zu betrachten. Diese Leiterschleife soll die Form eines Rechtecks haben, so dass zwei gerade Leiterstücke genau senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes (und damit parallel zur Drehachse) orientiert sind. Bei einer Rotation um die Achse erfahren nur diese beiden Leiterstücke eine für die Drehung relevante Lorentz-Kraft, die beiden anderen Leiterabschnitte (welche senkrecht zur Drehachse ausgerichtet sind) können in dieser Hinsicht außer Betracht bleiben.

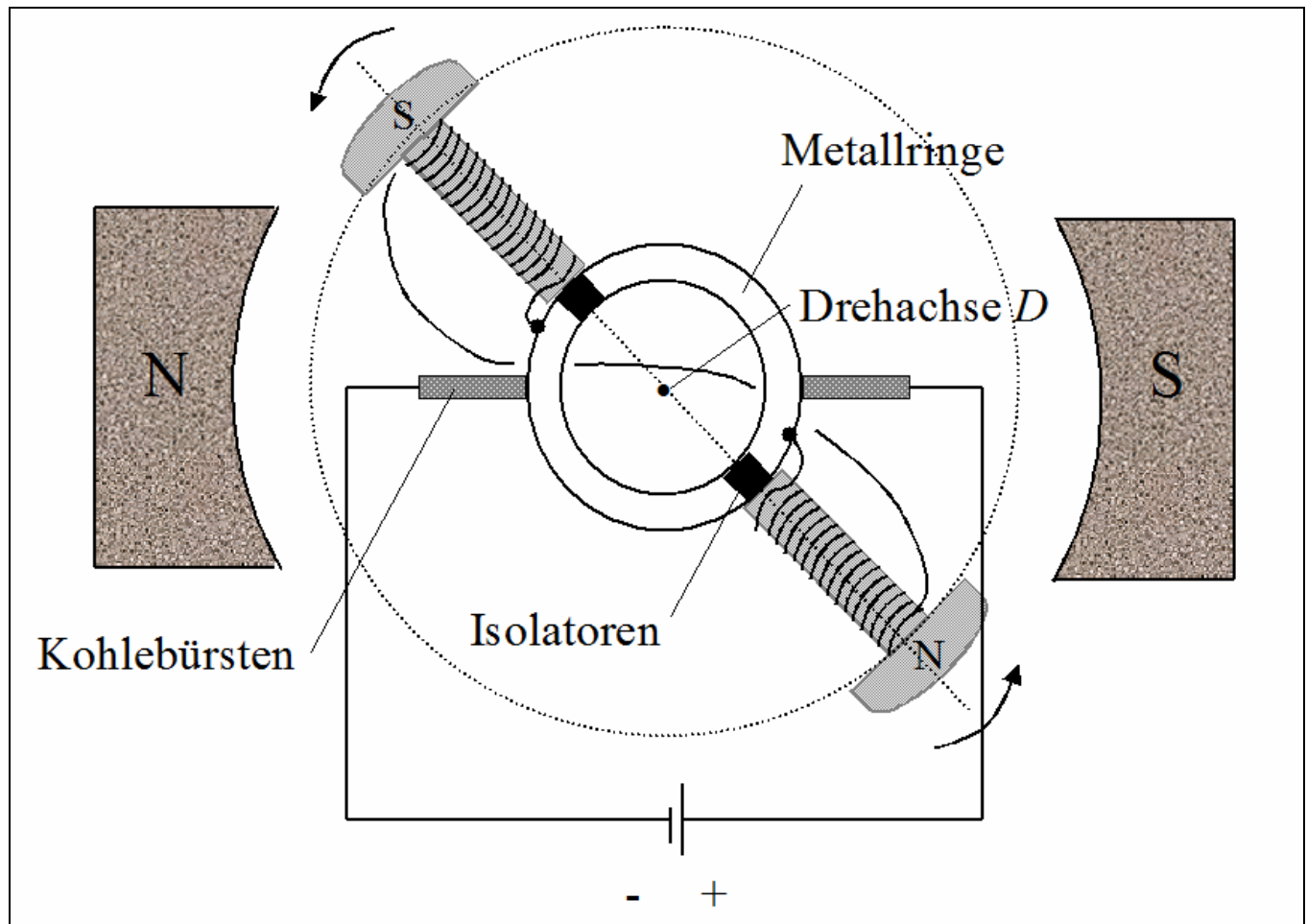


Abb. 7.3.2: Schematischer Aufbau eines Gleichstrommotors mit Feldmagnet, Rotor und Kommutator. Die um die Achse D drehbar angebrachte stromdurchflossene Spule kann als Stabmagnet betrachtet werden; auf diesen üben die fest angebrachten Pole des Feldmagneten Kräfte aus, so dass eine Drehbewegung erfolgt.

Die Stromzufuhr zur Spule geschieht durch eine Gleichspannungsquelle über „Kohlebürsten“ und zwei gegeneinander elektrisch isolierte Halbringe, die den Anschluss zur Spule herstellen und sich mit ihr drehen. Dieser „Kommutator“ bewirkt in der Spule die Umkehr der Stromrichtung in den „Totpunkten“, so dass eine kontinuierliche Drehbewegung zustande kommt.

Es sei betont, dass der zweite hier vorgestellte Weg umfassendere Kenntnisse als der erste erfordert. Das Auftreten der Lorentz-Kraft ist durch entsprechende Versuche zu belegen und verlangt darüber hinaus vom Schüler ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen. Allerdings kann mit diesem Konzept bei entsprechenden Kenntnissen der Mechanik eine quantitative Aussage über das beim Gleichstrommotor verfügbare Drehmoment gemacht werden.

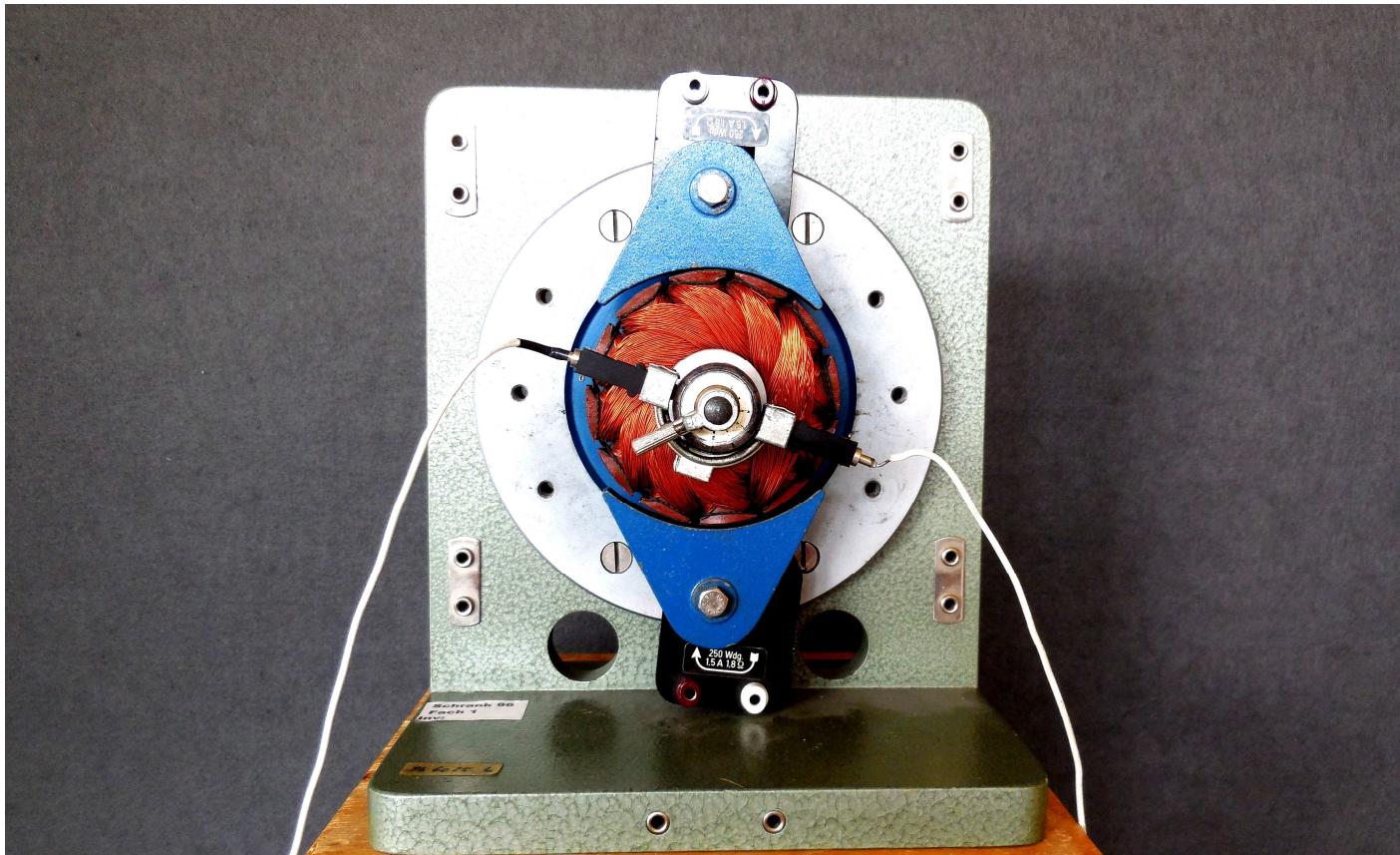


Abb. 7.3.3: Bild eines Trommelankers. Er besteht aus einer großen Anzahl versetzt gegeneinander gewickelter Schleifen; entsprechend geschieht die Stromzufuhr zu diesem Rotor über die dazu gehörige Anzahl elektrischer Anschlüsse. Der Kommutator ist also im Vergleich zum einfachen Grundmodell entsprechend erweitert.

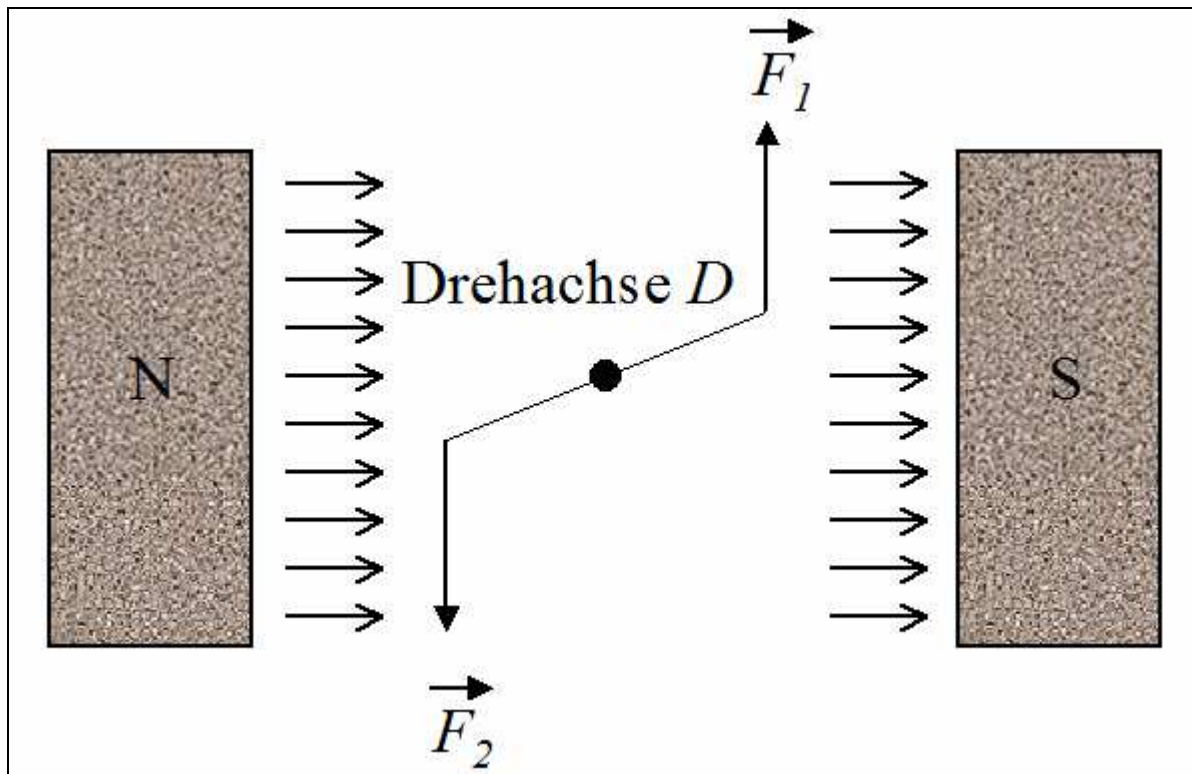


Abb. 7.3.4: Schematischer Querschnitt durch eine im homogenen Feld des äußeren Magneten rotierende Schleife. Die Entstehung der Drehbewegung wird hier als Folge der Lorentz-Kraft gedeutet, die auf das quer zur Feldrichtung orientierte Leiterstück wirkt. In diesem Fall ist das aus der Lorentz-Kraft resultierende Drehmoment, das auf die Schleife wirkt, nicht konstant, da sich die Länge des wirksamen Hebels während der Rotation ständig ändert. Beim oberen Teil des eingezeichneten Leiterstückes ist die Bewegung eines positiven Ladungsträgerstromes auf den Betrachter zu gerichtet.

Ergänzung

Die in einem bestimmten Abstand von der Drehachse wirkenden Kräfte verursachen ein Drehmoment, welches die Leiterstücke in Rotation versetzt. Bei einem homogenen äußeren Magnetfeld ist dieses Drehmoment nicht konstant, da die Kräfte bei jeder Stellung der Leiter in dieselbe Richtung weisen und weil sich der wirksame Teil des Hebels im Laufe einer Umdrehung dauernd ändert (zwischen einem Maximalwert und null). Ein konstantes

Drehmoment lässt sich dennoch erzielen, wenn durch eine geeignete Formgebung der Polschuhe des Feldmagneten dafür gesorgt wird, dass sich das gerade Leiterstück stets senkrecht zur Richtung des äußeren Magnetfeldes bewegt. Mit einem Radialfeld kann dies bewerkstelligt werden.

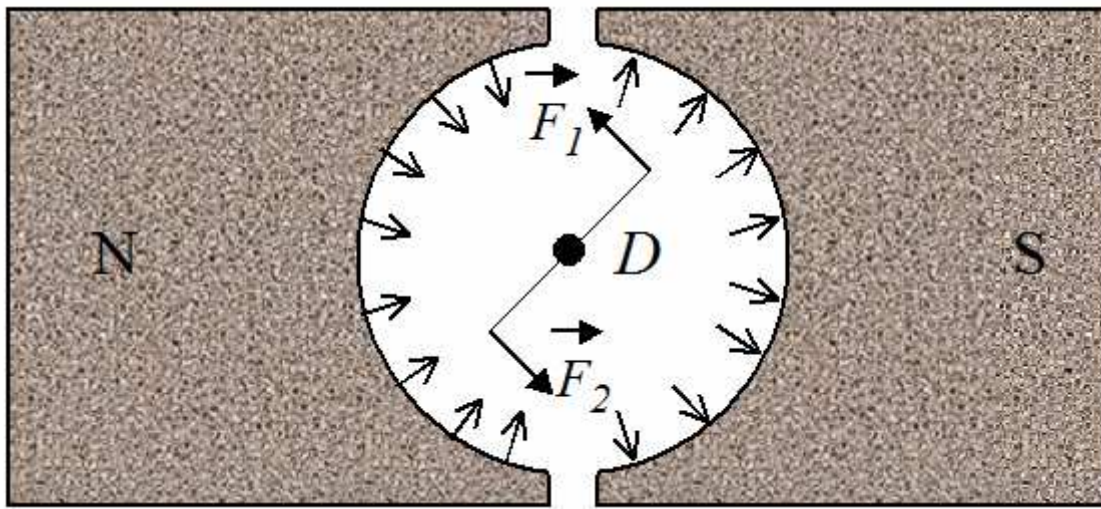


Abb. 7.3.5: Schematischer Querschnitt durch eine rotierende Schleife im Radialfeld des äußeren Feldmagneten. In diesem Fall kann ein konstantes Drehmoment auf die Leiterschleife erreicht werden, denn die wirksame Kraft und der Hebelarm stehen stets senkrecht aufeinander und ändern sich betragsmäßig nicht

Ist I die Stromstärke durch das gerade Leiterstück (unter Berücksichtigung der Anzahl der Leiterstücke), und ist l die Länge des vom Magnetfeld durchsetzten Leiters, so folgt in diesem Fall für die Lorentz-Kraft auf den Leiterabschnitt:

$$F = l I B .$$

Wird mit r der Abstand des Leiterstückes von der Drehachse bezeichnet, so ergibt sich für den Betrag des Drehmomentes bei

Beachtung des Tatbestandes, dass zwei gerade Leiterabschnitte vorhanden sind:

$$M = 2 r F$$

$$M = 2 r l I B .$$

Eine Vergrößerung des Drehmomentes kann erreicht werden, wenn mehrere Leiterstücke um einen kleinen Winkel versetzt auf der Achse angebracht und zusammengeschaltet werden.

Hinweise auf Motoren anderer Bauart

Die vorausgegangene Darstellung bezieht sich auf den Gleichstrommotor in einer sehr einfachen Bauweise. Es war das didaktische Anliegen, Aufbau und Funktionsweise dieser Maschine in ihren Grundlagen darzustellen. Einige besondere Aspekte sollen noch ergänzt werden.

a) Einer dieser Aspekte ist es, dass dieser Motor (wie der Name schon sagt) nur mit Gleichspannung betrieben werden kann, da als Feldmagnet ein Dauermagnet benützt wird und ein Betrieb des Rotors folglich nur mit Gleichspannung möglich ist. Man kann jedoch diesen Permanentmagneten durch einen Elektromagneten ersetzen, und man erhält dann zwei unterschiedliche Schaltungsmöglichkeiten für den Motor. In diesen beiden Fällen benützt man eine Gleichspannungsquelle, und für den Anschluss des äußeren Feldmagneten und des Rotors an die elektrische Quelle bestehen zwei Möglichkeiten:

- Man kann Feldmagnet und Rotor in Reihe schalten und erhält dann den „Hauptschlussmotor“.
- Man schaltet Feldmagnet und Rotor parallel zur elektrischen Quelle, das Ergebnis ist der „Nebenschlussmotor“.

Die beiden Motorarten unterscheiden sich deutlich in ihren Eigenschaften. Die Drehzahl des Hauptschlussmotors ist von der Belastung abhängig; bei starker Belastung ist die Drehzahl klein, das wirksame Drehmoment groß und die Leistungsaufnahme des Motors ebenfalls recht groß. Verwendet

wird diese Schaltungsart dort wo beim Start des Motors ein großes Drehmoment gewünscht wird, also z.B. bei Motoren in Lokomotiven und Straßenbahnen. Der Motor weist jedoch eine Besonderheit auf: Im Leerlauf (also bei der Belastung „nahezu null“) kann der Motor „durchgehen“, d.h. seine Drehzahl wächst in diesem Fall ständig, und um dies zu verhindern muss beim Anlassen ein hinreichend großer Vorschaltwiderstand in den Leiterkreis gelegt werden.

Beim Nebenschlussmotor ist die Drehzahl weitgehend konstant, das verfügbare Drehmoment ist allerdings kleiner als beim Hauptschlussmotor. Verwendet werden diese Motoren u.a. bei Haushaltsgeräten.

b) Beide Motoren - Hauptschluss- und Nebenschlussmotor - weisen noch eine Besonderheit auf: Die Motoren können nicht nur mit Gleichspannung, sondern auch mit Wechselspannung betrieben werden; man bezeichnet sie deshalb als Allstrom- oder Universalmotoren. Der Grund für diese Eigenschaft liegt darin, dass sich bei Anschluss dieser Geräte an eine Wechselspannung die Richtung des Ladungsträgerstromes sowohl in der Feldwicklung als auch im Rotor gleichzeitig umkehrt, so dass der Drehsinn des Rotors unverändert erhalten bleibt. Dieser Vorgang funktioniert bei nicht allzu großer Frequenz der angelegten Wechselspannung; bei großen Frequenzen machen sich Relaxationseffekte bei der Umkehrung der Richtung der Magnetfelder in den Eisenkernen störend bemerkbar.

c) Der Typ des Elektromotors, der heute sehr viel verwendet wird, ist der Asynchronmotor. Bei diesem Motor werden die Feldspulen an ein Drei-Phasen-Drehstromnetz angeschlossen. Der Rotor ist ein so genannter Kurzschluss-Läufer; er besteht im Wesentlichen aus einem geschlossenen Leiterkreis ohne darin befindliche elektrische Quelle. Das Prinzip besteht darin, dass das umlaufende magnetische Drehfeld der Feldspulen in den Leiterschleifen des Rotors Ladungsträgerströme induziert, die ihrerseits von Magnetfeldern begleitet sind. Die Wechselwirkung zwischen

den Magnetfeldern von Rotor und Feldspulen sorgt für die Drehbewegung des Rotors, sofern dieser eine etwas kleinere Winkelgeschwindigkeit besitzt als das umlaufende magnetische Drehfeld - es muss also zwischen der Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes und derjenigen des Rotors ein „Schlupf“ bestehen. Asynchronmotoren können sehr robust gebaut werden und sind daher weit verbreitet.

d) Beim Betrieb eines Elektromotors treten Verluste auf, welche den Wirkungsgrad herabsetzen. Diese Verluste sind dafür verantwortlich, dass nicht die gesamte zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird. Beispielsweise treten Energieverluste in den Lagern des Rotors auf; sie sind bedingt durch die unvermeidliche Reibung und können durch regelmäßige Schmierung vermindert werden.

Weitere Verluste finden sich in den elektrischen Leitungen; ein Teil der zugeführten elektrischen Energie wird in Wärme umgewandelt. Dies lässt sich nur durch die Verwendung gut leitender Materialien (z.B. Kupfer) eingrenzen. Aus den Wärmeverlusten ergibt sich die Notwendigkeit einen Elektromotor zu kühlen, was durch die Anbringung eines Flügelrades an der Achse des Rotors möglich ist.

Weitere Verluste entstehen im Rotor durch die Umkehrung der Stromrichtung in den Wicklungen; dadurch erfolgt im Eisenkern ein ständiger Wechsel der Richtung des Magnetfeldes, und dieser unvermeidliche Prozess kann nur durch einen entsprechenden Energieaufwand in Gang gehalten werden.

Ein weiterer Punkt für die Entstehung von Verlusten ist der Tatbestand, dass sich der Eisenkern des Rotors in dem von außen wirkenden Magnetfeld dreht, dass also in dem Kern Spannungen induziert werden und damit Ladungsträgerströme entstehen (so genannte Wirbelströme). Diese sind in einem massiven Eisenkern besonders groß und können dadurch verkleinert werden, dass dieser massive Kern ersetzt wird durch eine Vielzahl von parallelen, aber untereinander elektrisch isolierten Blechen (geblätterter Eisenkern).

4. Abschirmung elektrischer und magnetischer Felder

In Forschung und Technik sind elektrische und magnetische Felder von großer Bedeutung, Zugang und Nutzung sind sehr wichtig. Es gibt jedoch auch Situationen, bei denen sich diese Felder störend bemerkbar machen, und dann stellt sich die Frage nach ihrer Abschirmung. Dies soll hier kurz dargestellt werden.

1. Abschirmung elektrischer Felder

Die Abschirmung elektrischer Felder ist auf der Grundlage des Phänomens der elektrischen Influenz möglich. Zu diesem Zweck umgibt man den abzuschirmenden Raum mit einer nach allen Seiten hin geschlossenen Ummantelung aus elektrisch gut leitendem Material (z.B. aus Kupfer). Wenn jetzt von außen her auf diesen Raum ein elektrisches Feld einwirkt, so sammeln sich auf Grund der Influenz die in der Ummantelung vorhandenen elektrischen Ladungsträger an der Oberfläche der Ummantelung an. Als Folge davon bleibt das Innere des umschlossenen Raumes vollständig feldfrei. Dabei ist es nicht unbedingt erforderlich, dass die Ummantelung eine geschlossene Fläche bildet; es genügt auch ein Drahtnetz, das allerdings hinreichend engmaschig sein muss. Die abschirmende Wirkung dieses „Faraday – Käfigs“ lässt sich durch eindrucksvolle Laborversuche demonstrieren (vgl. beispielsweise die Schauversuche im Deutschen Museum in München). Eine Deutung dieses Effektes kann durch die nachfolgende vereinfachte Modellvorstellung gegeben werden, welche auf dem Phänomen der elektrischen Influenz beruht. Dazu sind einige Annahmen erforderlich.

- Annahme 1: In der Ummantelung werden die Träger von negativen elektrischen Ladungen (hier die Elektronen) als frei beweglich angesehen. In Metallen kann diese Annahme als erfüllt betrachtet werden.
-
- Annahme 2: In der Ummantelung sollen auch die Träger positiver elektrischer Ladungen als frei beweglich

angesehen werden. Diese - dem leichteren Verständnis bei der unterrichtlichen Behandlung dienende - Annahme liegt bei Metallen nicht vor; sie ist an dieser Stelle eine zweckmäßige Modellvorstellung, welche später fallen gelassen und durch eine präzisere Betrachtung ersetzt werden kann.

- Annahme 3: Die Wandstärke der Ummantelung soll hinreichend groß sein, so dass die fraglichen Influenzerscheinungen nur in einer vergleichsweise dünnen Oberflächenschicht stattfinden.

Damit können wir uns dem konkreten Fall zuwenden. Als leicht überschaubares Beispiel wählen wir ein homogenes elektrisches Feld in welches wir zur Abschirmung einen quaderförmigen Körper aus Metall einbringen. Aus Gründen der einfachen Beschreibung des Phänomens soll der Körper im elektrischen Feld so orientiert sein, dass seine Stirnflächen von den Feldlinien senkrecht getroffen werden; die Längsflächen des Quaders liegen dann parallel zu den Feldlinien.

An diesem Beispiel lässt sich die (feld-)abschirmende Wirkung der Ummantelung wie folgt erklären: Die Feldlinien treffen senkrecht auf die erste Stirnfläche des Quaders und verlassen die zweite Stirnfläche ebenfalls wieder senkrecht zu dieser Fläche. Da wir - voraussetzungsgemäß - die Träger negativer und positiver Ladungen als frei beweglich betrachten, so werden sich in der nebenstehenden Abbildung unter dem Einfluss des äußeren elektrischen Feldes auf der links gezeichneten Stirnfläche des Körpers negative Ladungsträger und auf der rechts gezeichneten Stirnfläche positive Ladungsträger ansammeln, und zwar jeweils an diesen Außenflächen des Körpers. An den Längsflächen des Quaders (parallel zur Feldrichtung) erfolgt keine Ansammlung der beweglichen Ladungsträger, da die Verschiebung erst an der geometrischen Grenze der Ummantelung zum Stillstand kommt. Die verschobenen Ladungsträger sind Teil des Kollektivs aller in der Ummantelung vorhandenen Ladungsträger.

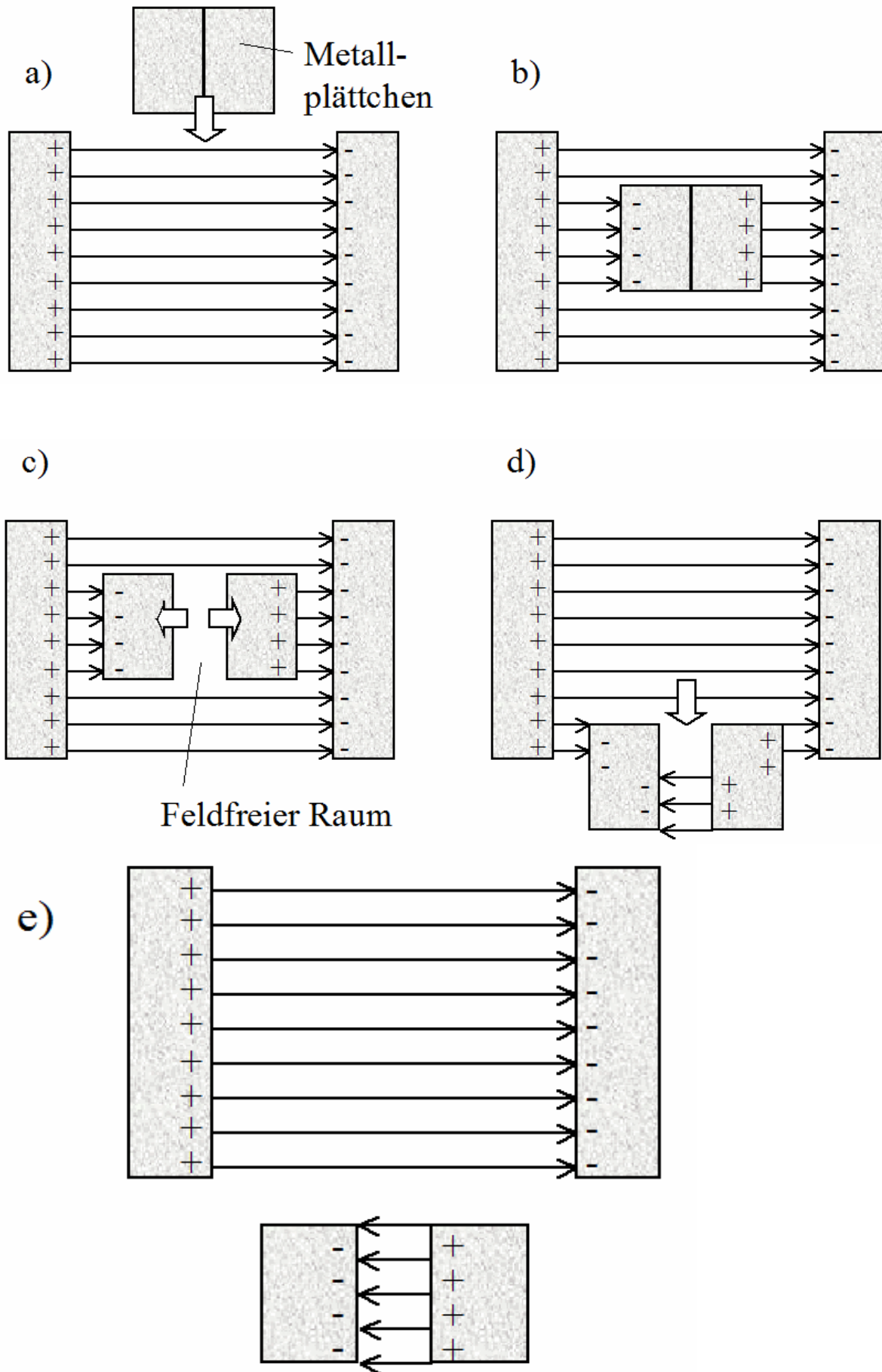


Abb. 7.4.1: Abschirmung eines elektrischen Feldes durch Ummantelung des betreffenden Raumes mit einem elektrisch gut leitenden Material. Gezeichnet ist ein Längsschnitt durch die würfelförmige Schutzhülle. Unter dem Einfluss des äußeren elektrischen Feldes sammeln sich die beweglichen Träger elektrischer Ladungen in den außen gelegenen Teilen der Schutzhülle an. Im Inneren der Ummantelung befinden sich weiterhin elektrisch neutrale Atome, so dass der eingehüllte Raum feldfrei bleibt. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes ist die Dicke der Schutzhülle extrem groß gezeichnet.

Es muss allerdings hervorgehoben werden, dass die Anzahl der verschobenen Teilchen sehr klein ist im Vergleich zur Gesamtzahl aller in der Ummantelung existierenden Ladungsträger. Die Folge davon ist, dass wir in den übrigen Teilen der Ummantelung nach wie vor elektrisch neutrale Atome haben, also insbesondere auch an den Innenseiten des Quaders. Dies bedeutet, dass innerhalb der Ummantelung kein elektrisches Feld existiert.

An dieser Stelle können wir unsere Annahme zwei (Beweglichkeit der Träger positiver Ladungen) fallen lassen. Die Ansammlung von Trägern positiver Ladungen an der rechts gezeichneten Stirnseite des Würfels können wir in folgender Weise deuten: Durch das äußere elektrische Feld werden die beweglichen negativen Ladungsträger nach links verschoben, und die ortsfesten Träger positiver elektrischer Ladungen bleiben zurück. In der Wirkung nach außen ist dies gleich bedeutend mit der Annahme von beweglichen Trägern positiver Ladungen.

2. Abschirmung magnetischer Felder

In der vorausgegangenen Betrachtung wurde die Frage nach der Abschirmung elektrostatischer Felder erörtert, und in entsprechender Weise stellt sich das Problem nach der Abschirmung magnetostatischer Felder.

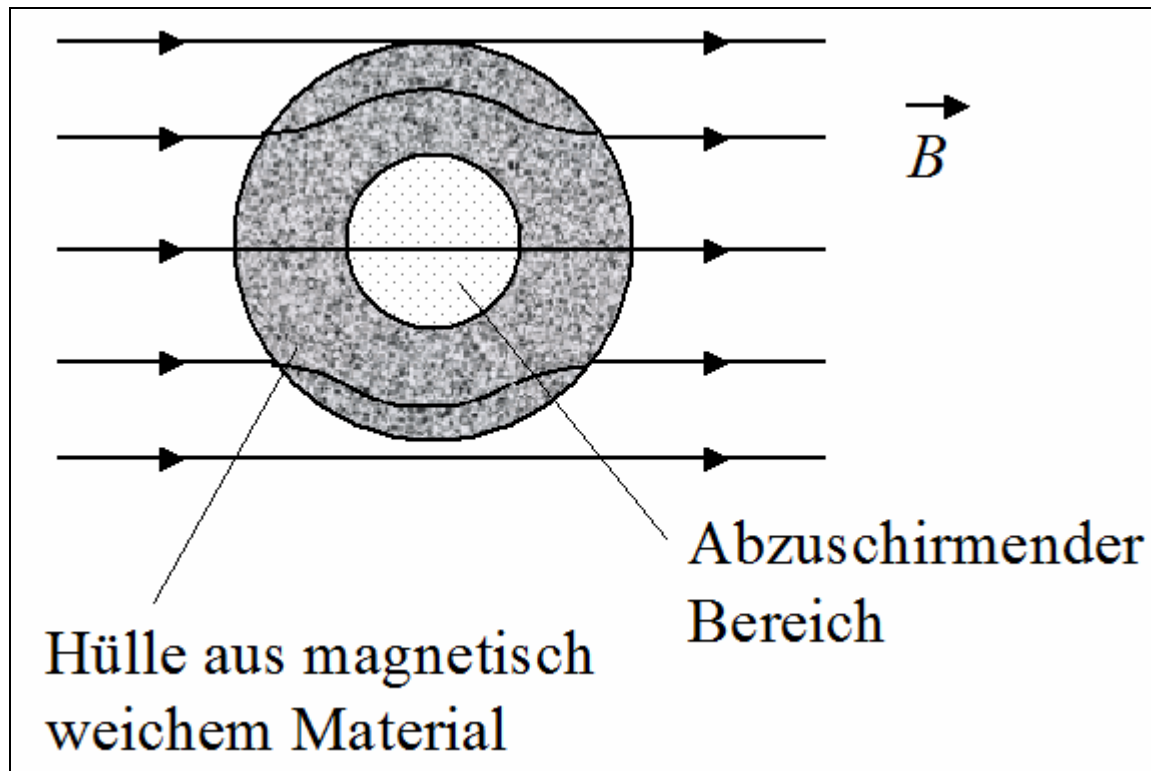


Abb. 7.4.2: Vereinfachte schematische Darstellung zur Abschirmung eines magnetostatischen Feldes. Gezeichnet ist ein Längsschnitt durch eine kugelförmige Umhüllung aus magnetisch weichem Material um den zu schützenden Hohlraum herum. Eine vollständige Abschirmung des betrachteten Raumes bezüglich des äußeren Magnetfeldes ist nicht möglich, da das Magnetfeld auf Grund der Materialeigenschaften der Ummantelung diese teilweise durchdringt und somit in den zu schützenden Raum gelangt.

Eine Möglichkeit ist die folgende: Man umgibt den abzuschirmenden Raum mit einer Hülle (z.B. in Form einer Hohlkugel) aus „magnetisch weichem“ Material (also aus Material mit einer großen relativen Permeabilität). Das wirkende magnetostatische Feld kann durch seine Feldlinien charakterisiert werden, und das Verhalten der Feldlinien an der Trennfläche zweier magnetisch unterschiedlicher Materialien gestattet eine Aussage über den Verlauf des zu betrachtenden Magnetfeldes. Die von außen auf die Umhüllung treffenden Feldlinien werden an der Trennfläche zwischen Vakuum (bzw. Luft) und der Ummantelung gebrochen, verlaufen weitgehend im Inneren der

Schutzhülle und treten dann wieder aus dieser in die umgebende Luft hinaus.

Eine Ausnahme von diesem geometrischen Verlauf liegt dann vor, wenn die Feldlinien senkrecht auf die Schutzhülle treffen. In diesem Fall erfolgt keine Brechung der Feldlinien, das Magnetfeld dringt durch das Umhüllungsmaterial in das Innere des abzuschirmenden Raumes ein. Dies bedeutet, dass eine vollständige Abschirmung von magnetostatischen Feldern nicht möglich ist, wohl aber eine weitgehende.

Eine zusätzliche Deutung dieses Phänomens ist mit Hilfe einer anderen Modellvorstellung als derjenigen der magnetischen Feldlinien in der nachfolgend beschriebenen Weise möglich. Wenn wir einen Blick zurück werfen auf die Abschirmung elektrostatischer Felder, so bestand die Grundlage der Abschirmung darin, dass die Träger elektrischer Ladungen als voll beweglich angesehen wurden. Bei einer modellmäßigen Betrachtung können wir im Falle magnetostatischer Felder analog zum elektrostatischen Beispiel vorgehen und an Stelle von elektrischen Ladungsträgern „Elementarmagnete“ einführen, die in größeren Bereichen gebündelt und innerhalb dieser Bereiche ausgerichtet sein sollen.

Im elektrischen Fall wurden die Träger elektrischer Ladungen als ideal beweglich angesehen, und eine Folge davon ist die Tatsache, dass elektrostatische Felder vollständig abgeschirmt werden können. Gemäß experimenteller Erfahrung ist bei magnetostatischen Feldern eine vollständige Abschirmung **nicht möglich**. Daraus ergibt sich, dass die angenommenen mikroskopischen magnetischen Bereiche nur teilweise beweglich sein können. Weiter gehende Untersuchungen zeigen, dass die genannten „Elementarmagnete“ des magnetisierbaren Materials nicht mittels einer Translationsbewegung verschiebbar sind, sondern lediglich in einem beschränkten Umfang gedreht werden können. Aus diesem Grund ist - anders als im elektrischen Fall - nur eine teilweise Abschirmung von Magnetfeldern möglich.

5. Zur Erfassung des Begriffes der Feldstärke

In der nachfolgenden Darlegung soll zunächst die Entwicklung des Begriffs der Feldstärke am Beispiel des elektrostatischen Feldes aufgezeigt werden. Anschließend wird diese Vorstellung verallgemeinert und die gefundene Struktur auf das Gravitationsfeld und auf das magnetostatische Feld übertragen. Es zeigt sich, dass die statischen elektrischen und magnetischen Felder sowie das Gravitationsfeld mit Hilfe einer strukturell einheitlichen Vorstellung beschrieben werden können. Dieser Tatbestand spiegelt sich auch in einer entsprechend übereinstimmenden Form der Maßeinheiten wider. Weiter lässt sich auf der Grundlage von Analogieschlüssen zeigen, dass die Berechnung der Energiedichte eines Gravitationsfeldes in Analogie zur quantitativen Vorgehensweise bei elektrostatischen und magnetostatischen Feldern in übersichtlicher und einfacher Weise möglich ist. Es muss jedoch betont werden, dass sich die Analogie zwischen dem Magnetfeld und den beiden anderen Feldern wegen des Fehlens magnetischer Monopole auf Sonderfälle beschränkt.

5.1 Der Begriff der elektrischen Feldstärke und seine Verallgemeinerung

Ausgangspunkt unserer Überlegungen ist der Begriff der elektrischen Feldstärke, der am Sonderfall des stationären homogenen elektrischen Feldes zwischen den Platten eines geladenen Kondensators untersucht wird. Nach Festlegung einer Begriffsdefinition wird versucht, diese Vorgehensweise auf ein homogenes, zeitlich konstantes Feld zu erweitern.

5.1.1 Einführung des Begriffes der elektrischen Feldstärke

In einem vorausgegangenen Kapitel wurde die Einführung des Begriffs der elektrischen Feldstärke \vec{E} bereits ausführlich dargestellt, sodass hier eine kurze Wiederholung genügen kann.

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das homogene Feld zwischen den Platten eines geladenen Kondensators. Das Feld soll sich im

Laufe der Zeit nicht ändern, es wird als stationär angesehen. Als nächstes muss eine Messmöglichkeit für das Feld gefunden werden. Dazu versieht man einen kleinen Probekörper (z.B. ein Holunderkugelnchen) mit einer elektrischen Ladung und bringt dann das an einem isolierenden Faden hängende Kugelnchen in das Feld ein. Das Feld übt auf diesen geladenen Probekörper eine Kraft aus, wodurch die als Pendel aufgehängte kleine Kugel seitlich ausgelenkt wird. Aus den vorliegenden experimentellen Daten kann dann die Größe dieser Kraft aus einer Gleichgewichtsbetrachtung bestimmt werden (die betreffende Kraft befindet sich mit der Gewichtskraft der kleinen Kugel und der Fadenkraft im statischen Gleichgewicht). Hervorzuheben ist der Tatbestand, dass die elektrische Ladung auf der Kugel so klein sein soll, dass dadurch das ursprünglich vorhandene elektrische Feld nur minimal - im Idealfall gar nicht - verändert wird. Für den einzuführenden Begriff der elektrischen Feldstärke \vec{E} lässt sich dann folgende Definition geben;

$$\text{El. Feldstärke} = \frac{\text{Kraft auf positiv geladenen Probekörper}}{\text{elektrische Ladung des Probekörpers}} .$$

Wird die elektrische Feldstärke mit \vec{E} , die auf den positiv geladenen Probekörper wirkende Kraft mit \vec{F} und die Größe der positiven elektrischen Ladung des Probekörpers mit $(+q)$ bezeichnet, so ergibt sich:

$$\vec{E} = \vec{F} / +q .$$

Die Einheit der elektrischen Feldstärke im SI-System ist dann 1 N C^{-1} . Berücksichtigt man, dass die Einheiten 1 N und 1 V durch die Basiseinheiten im SI-System ausgedrückt werden können, so folgt für die Einheit der elektrischen Feldstärke

$$1 \text{ N C}^{-1} = 1 \text{ V m}^{-1} .$$

5.1.2 Verallgemeinerung des Begriffes der Feldstärke

Versucht man, die für das elektrostatische Feld gegebene Begriffsdefinition einer Feldstärke zu verallgemeinern, so kann man von folgendem Bild ausgehen:

In das vorhandene Feld wird ein kleiner Probekörper eingebracht. Dieser Körper darf das bestehende Feld in seiner Struktur nur minimal verändern; weiter muss der Probekörper eine Eigenschaft besitzen, auf Grund derer das bestehende Feld auf diesen Probekörper eine Kraft ausübt. Im Falle des elektrischen Feldes bedeutet dies, dass der Probekörper eine elektrische Ladung tragen muss und dass die Größe dieser Ladung experimentell bestimmt werden kann. Mit anderen Worten: Der Probekörper muss eine für das betreffende Feld und dessen Wirkungen charakteristische Eigenschaft besitzen derart, dass vom Feld auf den Probekörper eine Kraft ausgeübt wird. Diese Kraft und die Größe der charakteristischen Eigenschaft des Probekörpers müssen gemessen werden können. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so kann man folgende allgemeine Definition für die Festlegung des Begriffes der Feldstärke geben:

$$\text{Feldstärke} = \frac{\text{Kraft auf den Probekörper}}{\text{charakterist. Eigenschaft des Probekörpers}} .$$

Mit Worten formuliert bedeutet dies: Die Feldstärke ist der Quotient aus der Kraft, die auf den in das Feld eingebrachten Probekörper wirkt und aus der bezüglich dieses Feldes charakteristischen Eigenschaft des Probekörpers. Im Falle der elektrischen Feldstärke ist die charakteristische Eigenschaft des Probekörpers seine elektrische Ladung (definitionsgemäß eine positive Ladung). Nachfolgend wird versucht, diese allgemeine Definition einer Feldstärke auf das Gravitationsfeld an der Erdoberfläche anzuwenden.

5.2 Der Begriff der Gravitationsfeldstärke

Die im vorausgegangenen Abschnitt gegebene Begriffsdefinition der Feldstärke soll jetzt auf den Fall der Gravitationsfeldstärke an der Erdoberfläche angewandt werden. Zur Bestimmung der Gravitationsfeldstärke benötigen wir einen Probekörper, den wir in das Gravitationsfeld an der Erdoberfläche einbringen. Dies kann prinzipiell ein beliebiger Körper sein; anschließend ist mit einer statischen Methode die Kraft zu messen, welche dieser Probekörper im Gravitationsfeld der Erde erfährt. Experimentell bestimmt werden kann diese Kraft mit einer Federwaage. Wenn man von zusätzlichen Effekten - wie beispielsweise der Auftriebskraft in Luft und der Coriolis-Kraft - absieht, so kann man näherungsweise die gemessene Kraft (welche die Gewichtskraft des Probekörpers an der Erdoberfläche darstellt) mit der Gravitationskraft an der Erdoberfläche (herrührend von der betrachteten Gravitationsfeldstärke) gleichsetzen. Danach stellt sich die Frage nach der charakteristischen Eigenschaft des Probekörpers hinsichtlich der Einwirkung des Gravitationsfeldes der Erde auf diesen Probekörper. Sucht man eine quantitative Beschreibung der vom Gravitationsfeld der Erde ausgeübten Kraft, so wird die Antwort durch das Gravitationsgesetz gegeben: Die Erde wirkt vermöge ihrer aktiven schweren Masse auf den Probekörper, und dieser erfährt auf Grund seiner passiven schweren Masse die gemessene Gravitationskraft (welche unter den genannten Voraussetzungen näherungsweise gleich ist der gemessenen Gewichtskraft). Es sei betont, dass - bedingt durch die Symmetrie des Gravitationsgesetzes - auch der Probekörper auf die Erde wirkt; dies hat zur Folge, dass die aktive und die passive schwere Masse eines Körpers gleich groß ist und dass folglich eine Unterscheidung zwischen diesen beiden Begriffen an dieser Stelle entfallen kann. Für die vorliegende Betrachtung ist entscheidend, dass als charakteristische Eigenschaft des Probekörpers seine schwere Masse $(m_s)_{PK}$ anzusehen ist. Diese schwere Masse des Körpers kann mit Hilfe von Balkenwaage und Wägesatz direkt gemessen werden. Somit ergibt sich für jeden Körper an der Erdoberfläche die Gravitationsfeldstärke

$$|\vec{E}_{Grav}| = \frac{|\vec{F}_{Grav}|}{(m_s)_{PK}} = 9,81 \text{ N kg}^{-1} .$$

Dabei bedeutet \vec{F}_{Grav} die vom Gravitationsfeld der Erde auf den Probekörper ausgeübte Kraft.

Jetzt kann man versuchen, mit Hilfe zusätzlicher Kenntnisse – hier des Gravitationsgesetzes – dieses Ergebnis zu deuten. Lässt man – wie bereits angedeutet – die Auswirkungen von der Auftriebskraft in Luft und von der Coriolis-Kraft beiseite, so kann man die Gewichtskraft und die Gravitationskraft gleichsetzen, und man erhält gemäß unserer Definition für die Gravitationsfeldstärke die Beziehung:

$$|\vec{E}_{Grav}| = \frac{|\vec{F}_{Grav}|}{(m_s)_{PK}} .$$

$$|\vec{E}_{Grav}| = \left\{ G \frac{m_E \cdot (m_s)_{PK}}{(r_E)^2} \right\} / (m_s)_{PK} ,$$

wobei G die Gravitationskonstante, m_E die schwere Masse der Erde, r_E den Erdradius und $(m_s)_{PK}$ die schwere Masse des Probekörpers bedeuten. Für die Gravitationsfeldstärke an der Erdoberfläche ergibt sich dann mit den bekannten Werten der betreffenden Größen

$$|\vec{E}_{Grav}| = \left\{ G \cdot \frac{m_E}{(r_E)^2} \right\} = 9,81 \text{ N kg}^{-1} .$$

Liegt dieses Ergebnis vor, so kann man die Richtung der Betrachtungsweise umkehren: Man geht von der bekannten

Gravitationsfeldstärke an der Erdoberfläche aus, man kennt die charakteristische Eigenschaft des Probekörpers (nämlich seine schwere Masse) und man kann daraus gemäß der Beziehung

$$|\vec{F}_{\text{Grav}}| = |\vec{E}_{\text{Grav}}| \cdot (m_s)_{\text{PK}}$$

die wirkende Gravitationskraft berechnen.

Ein Rückblick zeigt, dass die hier definierte Größe „Gravitationsfeldstärke“ mit dem im Physikunterricht angesprochenen „Ortsfaktor“ (zur Berechnung der Gewichtskraft an der Erdoberfläche) übereinstimmt.

An dieser Stelle ist noch eine ergänzende Anmerkung angebracht. Die vorausgegangenen Betrachtungen beruhen auf den Prinzipien der Statik. Für die Gravitationsfeldstärke ergibt sich dabei im SI-System die Einheit 1 N kg^{-1} . Führt man die Einheit „1 N“ auf die Basiseinheiten des SI-Systems zurück, so folgt:

$$1 \text{ N kg}^{-1} = 1 \text{ m s}^{-2}.$$

Dies ist die Einheit einer Beschleunigung - ein Ergebnis, das zunächst nicht in das bisher gezeichnete Bild zu passen scheint. Erklären kann man diesen Tatbestand, wenn man überlegt, was mit einem Körper geschieht, den man im Gravitationsfeld der Erde frei fallen lässt. Unter dem Einfluss der Gravitationskraft führt der Körper eine beschleunigte Bewegung aus, und zwar mit der konstanten Beschleunigung

$$a = 9,81 \text{ m s}^{-2}.$$

Bei dieser Betrachtungsweise ist zu betonen, dass wir hier im Bereich der Mechanik den Boden der Statik verlassen und zu einem ganz anderen Sachverhalt übergehen, nämlich zu einem Problem der Dynamik: Man betrachtet die beschleunigte Bewegung eines Körpers, welche als Folge der wirkenden Gravitationskraft auftritt.

5.3 Der Begriff der magnetischen Feldstärke

Die vorausgegangenen Überlegungen beim elektrischen Feld und beim Gravitationsfeld beruhten auf der Betrachtung eines statischen Feldes. Will man diese Sichtweise auf das Magnetfeld übertragen, so sind einige Besonderheiten zu beachten, welche nachfolgend aufgeführt werden.

Punkt 1:

Will man die Betrachtungsweise, die hier beim elektrischen Feld angewandt wurde, auf das Magnetfeld übertragen, so ergibt sich ein grundlegendes Problem: Eine Beschreibung des Magnetfeldes, die ganz parallel zu derjenigen des elektrischen Feldes verläuft, ist nur möglich, wenn man die Magnetostatik als eigenständiges Teilgebiet der Physik betrachtet. In einem solchen Fall müsste man für die Magnetostatik eine eigene Grundgröße festlegen und die entsprechende Basiseinheit einführen. In einem früheren Abschnitt wurde dies bereits dargelegt. Da im SI-System der Magnetismus als Teilgebiet der Elektrizitätslehre behandelt wird, so entfällt diese Möglichkeit.

Punkt 2:

Die im SI-System verwendete Beschreibung des Magnetfeldes geht von der Elektrodynamik aus (nicht von der Magnetostatik), wie in einem vorausgegangenen Abschnitt in Zusammenhang mit der quantitativen Festlegung der magnetischen Flussdichte dargestellt wurde. Eine allgemeine quantitative Beschreibung eines Magnetfeldes – ähnlich derjenigen eines elektrostatischen Feldes – ist damit im vorliegenden Begriffssystem nicht möglich.

Punkt 3:

Will man dennoch versuchen, eine zum elektrostatischen Feld parallele Beschreibung des magnetostatischen Feldes zu erreichen, so muss man eine Zwischenlösung suchen. Dies ist in der Weise möglich, dass man die für die Magnetostatik wesentliche physikalische Größe herausgreift, nämlich den magnetischen Fluss (also diejenige Größe der Magnetostatik,

die im elektrostatischen Fall der elektrischen Ladung Q entspricht). Weiter muss man dann zur Messung dieser magnetischen Größe Φ auf die Definition und die Messmöglichkeit der Elektrodynamik zurückgreifen. Konkret bedeutet dies, dass bei der hier gewählten Vorgehensweise vorausgesetzt wird, dass der magnetische Fluss Φ (gemessen in V s) aus den Größen \vec{B} und \vec{A} (also aus der magnetischen Flussdichte \vec{B} und aus der Fläche \vec{A} , welche vom magnetischen Fluss durchsetzt wird) bestimmt werden kann, und zwar unabhängig vom Begriffssystem der Magnetostatik (!). Wird dies als Voraussetzung akzeptiert, so ist die quantitative Beschreibung der Intensität eines Magnetfeldes im Bereich der Magnetostatik in paralleler Weise zur Elektrostatik möglich. Dabei sei nochmals betont, dass bei diesem Weg die Lehre vom Magnetismus ausdrücklich als Teilgebiet der Elektrizitätslehre gesehen wird.

Nach dieser Vorbetrachtung können wir uns der eigentlichen Aufgabe zuwenden, nämlich dem Aufsuchen einer Messvorschrift für eine Größe, welche die Stärke des Magnetfeldes beschreibt.

Gegeben sei ein Magnetfeld, hergestellt durch einen Permanentmagneten. Als Probekörper (zur Messung der Stärke des vorliegenden Magnetfeldes) wählen wir einen schwachen, sehr langen Stabmagneten, den wir in das zu messende Magnetfeld einführen. Die Beschränkung auf einen langen Stabmagneten ist nötig, um die zum elektrostatischen Fall parallele einfache Situation herzustellen; in diesem Fall übt das gegebene Magnetfeld nur auf den einen Pol des Probekörpers eine Kraft aus, eine mögliche Einwirkung des Magnetfeldes auf den zweiten Pol des Probekörper soll so minimal sein, dass sie außer Betracht bleiben kann. Als „charakteristische Eigenschaft des Probekörpers“ wählen wir den am Ende des Stabmagneten vorhandenen magnetischen Fluss (Φ). Diese Größe wird – wie dargelegt – mit den Methoden der Elektrodynamik gemessen. Somit erhält man für die magnetische Feldstärke \vec{H} :

$$\text{Magn. Feldstärke} = \frac{\text{Kraft auf den Probekörper}}{\text{Magn. Fluss des Probekörpers}}$$

$$|\vec{H}| = \frac{|\vec{F}|}{\Phi_{\text{PK}}}.$$

Die Einheit der magnetischen Feldstärke \vec{H} ist in unserem Maßsystem dann $1 \text{ N V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Eine Umformung zeigt, dass dies im SI-System gleichbedeutend ist mit 1 A m^{-1} . Die Parallelität der magnetischen Feldstärke \vec{H} zur elektrischen Feldstärke \vec{E} ist vorhanden; die Einheit der elektrischen Feldstärke ist 1 N C^{-1} bzw. $1 \text{ N A}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Nach weiteren Umformungen wird auch die zweite Parallelität in den Einheiten sichtbar: Als Einheit der elektrischen Feldstärke ergab sich 1 V m^{-1} , als Einheit der magnetischen Feldstärke finden wir 1 A m^{-1} .

5.4 Zusammenschau der verschiedenen Feldstärken

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde der Begriff der Feldstärke in den verschiedenen Teilgebieten der Physik beleuchtet. Betrachtet wurde der Begriff in der Elektrostatik, in der Magnetostatik und in der Mechanik im Fall der Gravitation. Den drei Fällen gemeinsam ist ein mathematischer Zusammenhang, der die wirkenden Kräfte in Abhängigkeit der dabei auftretenden charakteristischen Größen (wie elektrische Ladung, magnetischer Fluss und schwere Masse) erfasst. In allen drei Fällen wird bei der Formulierung dieser Gesetze vorausgesetzt, dass die räumliche Ausdehnung der Zentren, von denen diese Kräfte ausgehen und auf die sie wirken, verhältnismäßig klein ist gegenüber ihrem Abstand. Geht man von diesem Gesetz für die wirkenden Kräfte aus, so kann daraus eine einheitliche Struktur für die betreffenden statischen Felder formuliert werden.

5.4.1 Das grundlegende Kraftgesetz

Das Gesetz der Elektrostatik, welches die Kräfte zwischen elektrisch geladenen Körpern beschreibt, ist das Coulomb'sche Gesetz für elektrische Ladungen. Wird vorausgesetzt, dass sich die dabei beteiligten elektrischen Ladungen auf zwei sehr kleinen (näherungsweise punktförmigen) Körpern befinden und dass der Abstand zwischen diesen Körpern sehr groß ist im Vergleich zu ihrer räumlichen Ausdehnung, so kann das betreffende Gesetz wie folgt formuliert werden:

$$|\vec{F}_{el}| = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} .$$

Die wirkende Kraft kann direkt gemessen werden, ebenso die beteiligten elektrischen Ladungen und der Abstand zwischen den beiden Körpern.

Ganz entsprechend ist das Coulomb'sche Gesetz der Magnetostatik aufgebaut. Diejenige Größe, welche der „Elektrizitätsmenge“ (bzw. exakter formuliert der elektrischen Ladung) entspricht, ist im Falle der Magnetostatik die „Menge an Magnetizität“ bzw. der daraus abgeleitete Begriff der „magnetischen Ladung“ oder des „magnetischen Flusses“. Zwischen den als nahezu punktförmig angesehenen Polen zweier Permanentmagnete wirkt dann unter den genannten Voraussetzungen die Kraft:

$$|\vec{F}_{mag}| = \frac{1}{4\pi \mu_0} \cdot \frac{\Phi_1 \cdot \Phi_2}{r^2} .$$

Diese beiden von Coulomb formulierten Gesetze sind in ihrem Aufbau völlig gleich. Die wirkenden Kräfte nehmen mit dem Quadrat des Abstandes zwischen den Zentren ab, und sie sind den beteiligten Größen „elektrische Ladung“ und „magnetischer Fluss“ proportional. Die Proportionalität wird im elektrischen und

magnetischen Fall mit Hilfe einer charakteristischen Konstante beschrieben (der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 und der magnetischen Feldkonstanten μ_0).

Betrachtet man jetzt das Gravitationsgesetz, so ist dieses in gleicher Weise aufgebaut. Richtet man weiter den Blick auf diejenigen physikalischen Größen, welche die Entstehung der wirkenden Kräfte beschreiben, so sind dies im Falle der Gravitation die schweren Massen der beteiligten Körper. Die räumliche Ausdehnung dieser Körper soll auch hier sehr klein sein gegen über ihrem Abstand. Für konkrete Aufgaben lässt sich eine sehr hilfreiche Vereinfachung aufzeigen: Hat man es mit zwei kugelförmigen Körpern zu tun (z.B. Sonne und Erde), so kann die genannte mathematische Formulierung des Gravitationsgesetzes korrekt angewandt werden, wenn die wirksamen beteiligten Massen als punktförmig und als im Kugelmittelpunkt der beteiligten Körper befindlich angesehen werden können. Die Formulierung des Newton'schen Gravitationsgesetzes lautet somit:

$$|\vec{F}_{\text{Grav}}| = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} .$$

Dabei ist G die Gravitationskonstante, m_1 und m_2 sind die schweren Massen der beteiligten (nahezu punktförmigen) Körper und r bedeutet deren Abstand voneinander. Das Ziel ist es jetzt eine möglichst weitgehende Analogie zwischen den beiden Coulomb'schen Gesetzen und dem Newton'schen Gravitationsgesetz herzustellen. Dazu muss man das Gravitationsgesetz in die gleiche äußere Form bringen wie sie die beiden Coulomb'schen Gesetze besitzen. Dies lässt sich durch folgende Umformung erreichen:

$$G = \frac{1}{4\pi G_0} .$$

Dabei bedeutet G_0 eine „adaptierte Gravitationskonstante“, deren Wert sich aus der Gravitationskonstanten G ergibt zu:

$$G_0 = 1,193 \cdot 10^9 \text{ kg}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} .$$

Mit Hilfe dieser adaptierten Gravitationskonstanten G_0 kann das Gravitationsgesetz ganz entsprechend wie die beiden Coulomb'schen Gesetze geschrieben werden. Es folgt:

$$|\vec{F}_{\text{Grav}}| = \frac{1}{4\pi G_0} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} .$$

Damit erhält man eine mathematisch einheitliche Beschreibung für die wirkenden Kräfte in der Elektrostatik, in der Magnetostatik und in der Statik der Mechanik. Die drei beteiligten Feldkonstanten sind:

- Die elektrische Feldkonstante:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (A s)}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

- Die magnetische Feldkonstante:

$$\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-4} \text{ (V s)}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

- Die adaptierte Gravitations-Feldkonstante:

$$G_0 = 1,193 \cdot 10^9 \text{ (kg)}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} .$$

Die begriffliche Parallelität dieser drei Feldkonstanten zeigt sich auch in ihren dazugehörigen Maßeinheiten im SI-System. Die im Nenner stehenden Maßeinheiten sind gleich, im Zähler steht jeweils das Quadrat der Maßeinheit derjenigen physikalischen Größe, welche für das betrachtete Kraftgesetz wesentlich ist; im Fall der Elektrostatik ist dies die Einheit der elektrischen Ladung, im Fall der Magnetostatik die Einheit des magnetischen Flusses und im Fall der Gravitation die Einheit der schweren Masse.

5.4.2 Die jeweiligen Feldstärken bei nahezu punktförmigen Kraftzentren

In den vorausgegangenen Darlegungen wurde eine allgemeine Definition des Begriffs der „Feldstärke“ als Quotient der auf einen Probekörper (welcher in das zu messende Feld eingebracht wird) wirkenden Kraft und einer für den Probekörper charakteristischen physikalischen Größe vorgestellt. Geht man weiter davon aus, dass die hier betrachteten statischen Felder zwischen nahezu punktförmigen Zentren wirken, so ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Feldstärken. Diese Felder sind kugelsymmetrisch aufgebaut; im Kugelmittelpunkt befindet sich der das Feld erzeugende, als punktförmig angesehene Körper.

a) Elektrostatisches Feld einer punktförmigen Ladung:

$$|\vec{E}_{el}| = \frac{|\vec{F}|}{q_2},$$

wobei q_2 die elektrische Ladung des eingebrachten Probekörpers bedeutet. Bei Heranziehung des betreffenden Coulomb'schen Gesetzes folgt:

$$|\vec{E}_{el}| = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{r^2}.$$

Dabei bedeutet Q_1 die das Feld erzeugende elektrische Ladung. Als Einheit im SI-System ergibt sich 1 N C^{-1} bzw. $1 \text{ N A}^{-1} \text{ s}^{-1}$ und bei entsprechender Umformung 1 V m^{-1} . An der Erdoberfläche erhält man den Wert $|\vec{E}_{el}| = 130 \text{ V m}^{-1}$.

b) Magnetostatisches Feld eines punktförmigen Magnetpoles:

Entsprechend dem elektrostatischen Fall ergibt sich im magnetostatischen Fall für die Feldstärke \vec{H} (welche man streng analog auch als \vec{E}_{mag} bezeichnen könnte):

$$|\vec{H}| = \frac{|\vec{F}|}{\Phi_2},$$

wobei Φ_2 den magnetischen Fluss des in das zu messende Magnetfeld eingebrachten Probekörpers bedeutet. Bei Annahme von nahezu punktförmigen Magnetpolen folgt dann aus dem Coulomb'schen Gesetz der Magnetostatik für die magnetische Feldstärke, welche von einem Magnetpol des magnetischen Flusses Φ_1 hervorgerufen wird;

$$|\vec{H}| = \frac{1}{4\pi \mu_0} \cdot \frac{\Phi_1}{r^2}.$$

Im SI-System ergibt sich als Einheit $1 \text{ N V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bzw. nach Umformung 1 A m^{-1} . An der Erdoberfläche hat das Magnetfeld angenähert den Wert $|\vec{H}| = 16 \text{ A m}^{-1}$.

c) Gravitationsfeld eines nahezu punktförmigen Gebildes:

Im Falle des Gravitationsfeldes ergibt sich für die Gravitationsfeldstärke, welche durch einen (als punktförmig betrachteten) Körper der schweren Masse m_1 hervorgerufen wird:

$$|\vec{E}_{\text{Grav}}| = \frac{1}{4\pi G_0} \cdot \frac{m_1}{r^2}.$$

Die Einheit der Gravitationsfeldstärke im SI-System ist 1 N kg^{-1} , der betreffende Wert an der Erdoberfläche beträgt $|\vec{E}_{\text{Grav}}| = 9,81 \text{ N kg}^{-1}$.

5.4.3 Betrachtung der Energiedichten der betreffenden Felder an der Erdoberfläche

Aus den bisherigen Darlegungen ist zu entnehmen, dass zwischen dem elektrostatischen und dem magnetostatischen Feld in begrifflicher Hinsicht eine deutliche Parallelität besteht. Zwei Beispiele mögen dies stellvertretend beleuchten.

- In der Elektrostatik wird die elektrische Ladung in der Einheit „1 A s“ gemessen.
- In der Magnetostatik lautet die entsprechende Größe „magnetische Ladung“, welche man im SI-System mit dem Wort „magnetischer Fluss“ bezeichnet und die in der Einheit „1 V s“ gemessen wird.

Für diese Parallelität kann man folgende „Vertauschungsregel“ formulieren:

Wenn man im Fall der Magnetostatik für einen physikalischen Begriff die dazu gehörige Einheit im SI-System sucht, so gehe man von der entsprechenden Maßeinheit im elektrostatischen Fall aus, und man ersetze dort die Einheit „1 A“ durch die Einheit „1 V“ (und umgekehrt). Auf diese Weise erhält man – unter den genannten Voraussetzungen – die Maßeinheit im magnetostatischen Fall.

Beispiel 1: Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist „1 V m⁻¹“, im magnetostatischen Fall ergibt sich für die Einheit der magnetischen Feldstärke „1 A m⁻¹“.

Beispiel 2: Die Einheit der elektrischen Feldkonstanten ϵ_0 ist „1 (A s)² N⁻¹ m⁻²“. Im entsprechenden Fall der Magnetostatik ergibt sich die Einheit der Feldkonstanten μ_0 zu „1 (V s)² N⁻¹ m⁻²“.

Die bisherigen Ausführungen mögen vielleicht als ästhetische Betrachtung erscheinen. Aus der aufgezeigten Parallelität von elektrischen und magnetischen Feldern einerseits und dem Gravitationsfeld andererseits lässt sich jedoch in höchst einfacher Weise die Lösung einer konkreten Aufgabe bewältigen, die ohne einen hier möglichen Analogieschluss wesentlich schwieriger wäre.

Die Frage lautet:

Wie groß ist die Energiedichte des Gravitationsfeldes an der Erdoberfläche?

Zur Lösung des Problems betrachtet man die entsprechenden Energiedichten des elektrischen und des magnetischen Feldes. Es ergeben sich im elektrischen und im magnetischen Fall (für das Vakuum bzw. für Luft) die folgenden Gleichungen:

$$(\Delta W)_{\text{el}} / (\Delta V) = (1/2) \epsilon_0 |\vec{E}_{\text{el}}|^2$$

$$(\Delta W)_{\text{mag}} / (\Delta V) = (1/2) \mu_0 |\vec{H}|^2.$$

Die fraglichen Energiedichten der betreffenden Felder ergeben sich also aus der jeweiligen Feldstärke und der dazugehörigen Feldkonstanten. Übertragen wir dieses Ergebnis auf das Gravitationsfeld, so folgt unter Benutzung der „adaptierten Gravitationskonstanten G_0 “ im Rahmen eines Analogieschlusses für die gesuchte Energiedichte des Gravitationsfeldes folgende Beziehung:

$(\Delta W)_{\text{Grav}} / (\Delta V) = (1/2) G_0 \vec{E}_{\text{Grav}} ^2 .$

Bezieht man sich auf die Situation an der Erdoberfläche, so ergibt sich bei den betrachteten Feldern unter Verwendung der bekannten Zahlenwerte:

Für die Energiedichte des elektrischen Feldes:

$$(\Delta W)_{\text{el}} / (\Delta V) = 7,48 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-3}$$

Für die Energiedichte des magnetischen Feldes:

$$(\Delta W)_{\text{mag}} / (\Delta V) = 1,61 \cdot 10^{-2} \text{ J m}^{-3}$$

Für die Energiedichte des Gravitationsfeldes:

$$(\Delta W)_{\text{Grav}} / (\Delta V) = 5,74 \cdot 10^{10} \text{ J m}^{-3}.$$

Es ist zweckmäßig sich diese Zahlenwerte an einem konkreten Beispiel zu verdeutlichen. Wählt man das Volumen eines Seminarraumes ($\Delta V = 150 \text{ m}^3$), so ergeben sich für die in diesem Volumen vorhandenen Energien der einzelnen Felder folgende Werte:

- Energie des elektrischen Erdfeldes: $(\Delta W)_{\text{el}} = 1,12 \cdot 10^{-9} \text{ J}$
- Energie des magnetischen Erdfeldes: $(\Delta W)_{\text{mag}} = 2,42 \cdot 10^0 \text{ J}$
- Energie des Gravitationsfeldes: $(\Delta W)_{\text{Grav}} = 8,61 \cdot 10^{12} \text{ J}$

Zur Einschätzung dieser Werte soll jetzt der Energiebedarf eines Einfamilienhauses (Wohnfläche 200 m^2) herangezogen werden. Nach gegenwärtig benutzten Daten benötigt man für ein solches (relativ gut wärmegeprägtes) Gebäude in Mitteleuropa eine Energie von ungefähr 80 kWh zum Beheizen von 1 m^2 Wohnfläche in 1 Jahr. Bei dieser Annahme liegt also der jährliche Energiebedarf zum Heizen bei

$$(\Delta W) = 5,76 \cdot 10^{10} \text{ J}.$$

Nimmt man jetzt die in dem Seminarraum vorhandenen Energien des elektrischen, des magnetischen und des Gravitationsfeldes, so kann man fragen, wie lange man das betrachtete Einfamilienhaus damit heizen kann. Es ergibt sich folgendes:

- Mit der Energie des elektrischen Feldes kann man das Haus ungefähr 10^{-12} s lang heizen; diese Energie ist de facto gleich null.
- Mit der Energie des Magnetfeldes kann man das Haus ungefähr $1 \cdot 10^{-3}$ s lang heizen. Auch dieser Energiebetrag ist für den betrachteten Fall ohne Bedeutung.
- Mit der in dem Seminarraum vorhandenen Gravitationsenergie könnte man das Einfamilienhaus 150 Jahre (!) lang heizen; dies ist ein außerordentlich großer Energiebetrag.

Damit stellt sich die Frage nach der praktischen Nutzungsmöglichkeit der Gravitationsenergie. Mit den - mindestens gegenwärtig - verfügbaren Mitteln ist eine solche nicht möglich.

Eine ähnliche Situation bezüglich einer vorhandenen, aber nicht nutzbaren Energie haben wir bei der in den Weltmeeren gespeicherten thermischen Energie. In der äquatorialen Zone ist die Wassertemperatur deutlich größer als in den Polarregionen. Wir haben also zwei Wärmebäder unterschiedlich großer Temperatur, und damit ist die grundsätzliche Voraussetzung zum Betrieb einer thermodynamischen Maschine gegeben, welche thermische Energie in mechanische Energie umwandeln kann. Die Realisierung eines solchen Gedankens ist allerdings eine andere Frage.

VIII. Literatur

ASIMOV, Isaac: „Biographische Enzyklopädie der Naturwissenschaften und der Technik“. Freiburg i.B.: Herder 1973.

BERGMANN, Ludwig / SCHAEFER, Clemens: „Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. II, Elektrizität und Magnetismus“. Berlin: de Gruyter 1971.

BERLINER, Arnold: „Lehrbuch der Physik“. Berlin: Springer 1934.

BREITSAMETER, Josef: „Elektrizität und Magnetismus“. In: „Lexikon der Schulphysik, Bd. 3 und Bd. 4“, Hrsg.: HÖFLING, Oskar. Köln: Aulis 1978.

BRAUCHLE, Eugen: „Elektrizitätslehre und Magnetismus“. Pädagogische Hochschule Reutlingen 1970.

DORN, Friedrich / BADER, Franz: „Physik - Mittelstufe“. Hannover: Schroedel 1980.

EINSTEIN, Albert: „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. In: Annalen der Physik 17 (1905), S.891 – 921.

FRANKE, Hermann: „Lexikon der Physik“. Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung 1969.

FRAUENFELDER, P. / HUBER, P.: „Einführung in die Physik, Bd. 2“. Basel: Ernst Reinhardt Verlag AG 1967.

FRAUNBERGER, Fritz: „Illustrierte Geschichte der Elektrizität“. Köln: Aulis 1985.

GAELLE, Meingosus: „Beyträge zur Erweiterung und Vervollkommnung der Electricitätslehre in theoretischer und practischer Hinsicht“, 2 Bde, Salzburg: Mayer'sche Buchhandlung 1813 – 1816.

GERTHSEN, Christian: „Physik - Ein Lehrbuch zum Gebrauch neben Vorlesungen“. Berlin: Springer 1960.

GÖTZ Rainer / DAHNCKE Helmut / LANGENSIEPEN Fritz (Hrsg.): „Elektrizitätslehre I“. In: „Handbuch des Physikunterrichts - Sekundarbereich I, Bd.5, Elektrizitätslehre I“. Köln: Aulis 1992.

GREHN, Joachim: „Metzler Physik“. Stuttgart: J.B.Metzlersche Verlagsbuchhandlung 1991.

GRIMSEHL, Ernst: „Lehrbuch der Physik, Zweiter Band: Magnetismus und Elektrizität“. Leipzig, Berlin: B.G. Teubner 1920

HAHN, Karl: „Methodik des physikalischen Unterrichts“. Leipzig: Verlag von Quelle & Meyer 1927.

HERMANN, Armin: „Geschichte der Physik“. In: „Lexikon der Schulphysik, Bd. 7 u. Bd. 8“, Hrsg.: HÖFLING, Oskar. Köln: Aulis 1978.

HOPPE, Edmund: „Geschichte der Physik“. Braunschweig: Vieweg 1926. Reprint: Johnson Reprint Corporation, New York 1965.

HOPPE, Edmund: „Geschichte der Elektrizität“. Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1884. Reprint: Dr. Martin Sändig oHG, Wiesbaden 1969.

JOOS, Georg: „Lehrbuch der theoretischen Physik“. Wiesbaden: Aula Verlag 1989.

LA COUR, Paul / APPEL, Jakob: „Die Physik auf Grund ihrer geschichtlichen Entwicklung“. Braunschweig: Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn 1905.

MACHOLD, Adolf: „Ist das WassermodeLL bei der Einführung der Elektrizitätslehre im Unterricht der Hauptschule „tot“?“, NiU 24 (1976, Heft 4), S. 139-142.

MACHOLD, Adolf: „Zur Behandlung von Strom und Spannung im Unterricht der Hauptschule“, NiU 24 (1976, Heft 7), S. 289-295

MACHOLD, Adolf: „Grundlagen der Elektrizitätslehre“. Pädagogische Hochschule Weingarten, 1997.

MACHOLD, Adolf: „Meingosus Gaelle – Ein vielseitiger Mönch der Benediktinerabtei Weingarten“, Im Oberland 2004, Heft 1, S. 44-50.

MESCHEDE, Dieter: „Gerthsen Physik“. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2006.

MEYER, M. Wilhelm: „Die Naturkräfte“. Leipzig und Wien: Bibliographisches Institut 1903.

MIE, Gustav: „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus“. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag 1941.

MUCKENFUSS, Heinz / Walz, Adolf: „Neue Wege im Elektrikunterricht“. Köln : Aulis 1992.

MÜLLER, Johann: „Grundriß der Physik und Meteorologie“. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn 1866.

POHL, Robert W.: „Einführung in die Physik, Zweiter Band, Elektrizitätslehre“. Berlin: Springer 1960.

RAMSAUER, Carl: „Grundversuche der Physik in historischer Darstellung, Erster Band“. Berlin: Springer 1953.

ROTH, Lothar / TREU, Martin: „Physik Oberstufe“. Bamberg: C.C. Buchners Verlag 1967.

URBANITZKY, Alfred Ritter von: „Physik“. Wien, Pest, Leipzig: A. Hartleben's Verlag 1892.

VOLTA, Alessandro: „On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds“. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 403-431. London: W. Bulmer and Co. 1800.

Reprint: BEVILACQUA, Fabio / BONERA, Giavanni, „Bicentary Edition in French, English, German and Italian of the Letter to Sir Joseph Banks of the 20th of March 1800“. Milano (Italy): Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 1999.

WALZ, Adolf: „Physik 8/10, Ausgabe Baden-Württemberg“. Hannover: Schroedel Schulbuchverlag 1983.

WALZ, Adolf: „E-Felder um stationäre Ströme“. Der Physikunterricht (PU) 18 (1984, Heft 2), S.61 – 68.

WARBURG, Emil: „Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende“. Tübingen: Verlag von J.C.B. Mohr (Paul Siebeck) 1917.

WESTPHAL, Wilhelm H.: „Physik“. Berlin: Springer 1970.

Bildnachweis

FRAUENFELDER, P. / HUBER, P.: „Einführung in die Physik, Bd. 2“. Basel: Ernst Reinhardt Verlag AG 1967. (S.171)

GUERICKE, Otto von: „Neue Magdeburger Versuche über den leeren Raum“. Waesberge: Verlag von Johannes Jansson 1672. Reprint: VDI Verlag Düsseldorf 1968. (S. 19)

GRIMSEHL, Ernst: „Lehrbuch der Physik, Zweiter Band: Magnetismus und Elektrizität“. Leipzig, Berlin: B.G. Teubner 1920. (S.72; S.74; S.75; S.77)

KOVACS, Laszlo: Universität Budapest, Abteilung Physik. (S.41)

LA COUR, Paul / APPEL, Jakob: „Die Physik auf Grund ihrer geschichtlichen Entwicklung“. Braunschweig: Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn 1905. (S.20; S.22; S.25; S.29; S.30; S.43; S.61; S.76; S.106; S.107; S.238)

MACHOLD, Gudrun; Esslingen am Neckar: Bilder auf den Umschlagseiten (Kohlekraftwerk Altbach am Neckar).

MACHOLD, Winulf; Hamburg. (S.86; S.88; S.102; S.110; S.124; S.136; S.142; S.145; S.147; S.148; S.151; S.153; S.162; S.168; S.181; S.264; S.266; S.269; S.276; S.281; S.282; S.295; S.297; S.298; S.304; S.306)

MEYER, M.Wilhelm: „Die Naturkräfte“. Leipzig und Wien: Bibliographisches Institut 1903. (S.79; S.117)

MÜLLER, Johann: „Grundriß der Physik und Meteorologie“. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn 1866. (S.115)

OPALKA, Friedrich; Abteilung Mathematik der Pädagogischen Hochschule Weingarten. (S.160)

POHL, Robert W.: „Einführung in die Physik, Zweiter Band, Elektrizitätslehre“. Berlin: Springer 1960. (S.260; S.261)

RAMSAUER, Carl: „Grundversuche der Physik in historischer Darstellung, Erster Band“. Berlin: Springer 1953. (S.66; S.68; S.123)

VOLTA, Alessandro: „On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different kinds“. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 403-431. London: W. Bulmer and Co. 1800.

Reprint: BEVILACQUA, Fabio / BONERA, Giavanni, „Bicentary Edition in French, English, German and Italian of the Letter to Sir Joseph Banks of the 20th of March 1800“. Milano (Italy): Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 1999. (S.94)

Abteilung Physik der Pädagogischen Hochschule Weingarten:
Übrige Abbildungen.



"Kohlekraftwerk" Altbach am Neckar